

# 计及响应不确定性的可调度负荷响应及 惩罚价格随机优化

周涛<sup>1</sup>, 钱寒晗<sup>1</sup>, 张纬<sup>1</sup>, 方天扬<sup>2</sup>, 李生虎<sup>2</sup>

(1. 国网安徽省电力公司电力交易中心有限公司, 安徽 合肥 230061;

2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**可调度负荷(DL)参与需求响应能够减小系统功率偏差,促进可再生能源消纳。但受到调节能力的限制,其响应应具有不确定性,进而影响各市场主体的利益。针对响应偏差可以制定惩罚机制,但惩罚过于宽松则效果有限,过于严苛则会降低DL的响应积极性。文中将响应偏差作为随机变量,基于响应价格与响应量、惩罚价格与响应偏差之间的关系,提出了针对DL响应量与惩罚价格的随机优化模型,并通过期望模型将其转化为确定性优化模型。最后,通过算例验证了所提模型的有效性。

**关键词:**可调度负荷; 响应不确定性; 惩罚价格; 随机优化; 电力市场

**中图分类号:** TM 732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)03-0001-07

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20220301

## Stochastic Optimization of Dispatchable Load Response and Punishment Price Considering Response Uncertainty

ZHOU Tao<sup>1</sup>, QIAN Hanhan<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, FANG Tianyang<sup>2</sup>, LI Shenghu<sup>2</sup>

(1. Power Exchange Center of State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230061, Anhui,

China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology,

Hefei 230009, Anhui, China)

**Abstract:** Dispatchable load (DL) participating in demand response will reduce system power deviation and promote renewable energy consumption. But with limited regulation capability, the response of DL is uncertain, which is undesirable to the market participators. A punishment mechanism for response deviation can be formulated. But a loose punishment is not effective, and a severe punishment will reduce the enthusiasm of DL supplier. Taking the response deviation as a random contributing factor, a stochastic optimization model of DL response amount and punishment price is proposed based on the relationship between response price and amount, punishment price and response deviation. With the expectation model, it is transformed to deterministic optimization model. Finally, the effectiveness of the proposed models is verified by numerical results.

**Key words:** dispatchable load; response uncertainty; punishment price; stochastic optimization; power market

## 0 引言

为了促进绿色低碳和可持续发展,大量可再生能源接入电网<sup>[1]</sup>,其间歇性和波动性为电力系统的安全稳定运行带来了巨大挑战<sup>[2]</sup>。传统发电机组调节能力有限,因此急需推进综合利用电源、电网、负荷、储能深度互动的新型电网调度模式,通过供需

基金项目:安徽省电力交易中心科技项目(B61213210009)

双方的互动提高可再生能源利用率,减小电网功率波动<sup>[3-4]</sup>。

储能电站调节灵活,但容量有限,且建设成本较高。相比之下可调度负荷(dispatchable load, DL)作为需求响应(demand response, DR)的一种,以利益为导向,改变用户的用电行为,具有巨大的潜力<sup>[5-6]</sup>。需求响应包括价格型需求响应和激励性需求响应<sup>[7]</sup>。文献[8]建立了实时市场的需求响应竞价模型确定响应价格。文献[9-10]通过预估消费

者对价格变化的潜在反应,优化响应价格。文献[11-12]计及响应成本,分别基于联合在线学习算法和博弈论,优化用户响应价格及响应决策。上述文献均针对价格型 DR,基于价格弹性确定响应定价<sup>[13]</sup>,而未考虑需求响应的不确定性。

DL 可以促进可再生能源的消纳,但二者均存在不确定性。文献[14-15]分别基于多时段最优潮流和两阶段鲁棒微电网协调策略,通过 DR 缓解可再生能源不确定性,实现效益最大。文献[16-19]综合考虑可再生能源出力、DR 的不确定性,分别提出了一种随机/稳健混合优化模型和随机风险约束,以避免利益分配的不合理,使期望成本最小化。但上述文献均针对价格型 DR 的不确定性,而非激励型 DR。文献[20]针对激励型 DR 建立惩罚机制;文献[21]考虑响应偏差所引起的罚款,但其罚款价格为定值,忽略了惩罚价格对 DL 响应偏差的影响。

现有研究多基于价格弹性优化价格型 DR 的定价策略,而缺乏对激励型 DR 响应价格研究。对于 DL 响应不确定性,现有文献建立惩罚机制,采用随机优化模型,而缺乏惩罚价格对 DL 响应偏差影响的研究。随着惩罚价格的升高,DL 提升其响应准确度,但过高惩罚价格会降低 DL 响应意愿。计及响应不确定性,可以通过优化算法确定 DL 响应量、惩罚价格最优值,增加各市场主体利益,其难点在于如何定量地描述响应量与响应价格、惩罚价格与响应偏差之间的关系,并在结算模型中引入响应偏差。响应偏差作为随机变量,增加了求解的难度。

针对量化交易价格对调节量的影响,首次提出了响应偏差与惩罚价格之间的关系。将 DL 响应偏差作为随机变量,结合现有的交易结算机制,考虑到各 DL 间的差异,提出了一种考虑 DL 响应偏差的调度和惩罚价格随机优化模型,通过优化 DL 响应量和惩罚电价,提升各市场主体利益。

## 1 计及响应不确定性的 DL 及结算模型

### 1.1 DL 模型

DL 参与 DR 市场的交易流程如图 1 所示。电力调度机构发布调节需求曲线、DL 的基线负荷。DL 根据基线负荷及用电需求,确定可参与 DR 的调节量,并发布调节的价量曲线。调度机构按申报价格由低到高进行市场出清,直至满足调节需求,或

DL 申报资源已全部被调用。

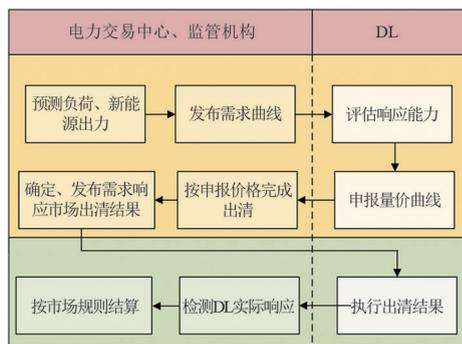


图 1 DL 参与 DR 的过程

DL 的调节量受调节价格影响。调节价格越高越能提升用户的响应意愿,相应调节量越大。为简化计算采用式(1)的一次函数和近似描述调节量与调节价格之间的关系,同时为提高模型的精度,实际关系可通过历史数据拟合得到,但所提算法仍然适用。

$$\rho_a = \rho_{a0} + k_a P_a \quad (1)$$

式中: $\rho_a$ 为调节价格; $\rho_{a0}$ 为负荷参与调节的报价下限; $k_a$ 为系数; $P_a$ 为可调节负荷功率。

DL 的调节量除了受补偿价格影响外,还需要考虑由于负荷削减或增加所造成的成本。响应成本与响应量之间的关系可用二次函数关系表示为<sup>[22]</sup>

$$C_a = b_1 P_a^2 + b_2 P_a \rho_a \quad (2)$$

式中: $C_a$ 为响应成本; $b_1$ 、 $b_2$ 分别为系数,其大小与负荷的响应意愿、负荷类型相关,可以通过实际运行经验获得。

出清结束后,由调度机构发布出清结果,DL 按出清结果削减或增加负荷。但由于调节能力以及其他不确定性因素的影响,DL 的实际调节量可能与中标量不一致。偏差程度  $D$  为

$$D = \frac{P_{a,w} - P_{a,r}}{P_{a,w}} \quad (3)$$

式中, $P_{a,w}$ 和  $P_{a,r}$ 分别为中标量和实际调节量。

可调度负荷响应偏差产生的主要原因在于由负荷预测偏差而导致响应量不足,此外也受负荷的规模、用电方式的灵活性以及一些突发情况的影响。响应的不确定性可能影响整个系统的供电可靠性。响应偏差的概率分布较为复杂,实际中可根据可调度负荷响应结果的历史数据统计得到,为简化计算,假设其服从正态分布<sup>[23]</sup>。可通过改变正态分布的均值和方差来体现不同可调度负荷响应偏差之间的差异,均值越接近 0,同时方差越小,则可调度负荷

响应的精度越高。对于申报量保守的可调度负荷,可将偏差程度的均值设为小于0的数。考虑 $D$ 取值上下限,修正概率密度函数 $f(D)$ 如图2中红色曲线所示,具体表达为

$$\begin{cases} f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma\varphi} e^{-\frac{(D-\mu)^2}{2\sigma^2}} \\ \varphi = \Phi\left(\frac{D_{\max}-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{D_{\min}-\mu}{\sigma}\right) \end{cases}, D_{\min} \leq D \leq D_{\max} \quad (4)$$

式中: $\mu$ 、 $\sigma$ 分别为 $D$ 的均值和标准差; $\varphi$ 为中间变量; $\Phi$ 为标准正态分布函数; $D_{\min}$ 、 $D_{\max}$ 分别为偏差程度最小值、最大值。

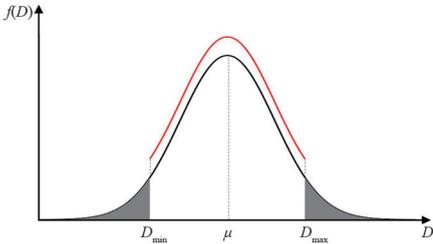


图2 修正后 $D$ 的概率密度函数

DL响应偏差过大及频繁违约,将导致系统功率不平衡,损害各市场主体利益,严重时甚至对电网安全产生影响。因此有必要对DL响应偏差进行惩罚。随着惩罚价格升高,偏差度减小,为简化计算,二者间关系可采用指数函数表示,故将式(3)改写为式(5)。

$$\frac{e^{-k_{p1}\rho_p D}}{k_{p2}} = \frac{P_{a,w} - P_{a,r}}{P_{a,w}} \quad (5)$$

式中: $\rho_p$ 为惩罚价格; $k_{p1}$ 、 $k_{p2}$ 为系数。

## 1.2 结算模型

DL完成调节后,电力交易机构根据其完成情况,对每个时段进行结算。完成度不同,所采用的结算方式也不同。这里采用的结算规则为:当DL实际调节量大于中标量的120%,则该时段按中标电量的120%进行结算;实际调节量小于中标电量70%的,则该时段不参与结算;其余情况则按实际调节量参与结算。对于结算价格,如果实际调节量大于中标量,则按中标电价,反之则按照实际调节量所对应电价参与结算<sup>[24]</sup>。DL实际收入表示为

$$P_{a,s}\rho_{a,s} = \begin{cases} 1.2 \times P_{a,w} \times \rho_{a,w} & 1.2P_{a,w} < P_{a,r} \\ P_{a,r} \times \rho_{a,w} & P_{a,w} \leq P_{a,r} \leq 1.2P_{a,w} \\ P_{a,r} \times \rho_{a,r} & 0.7P_{a,w} \leq P_{a,r} \leq P_{a,w} \\ 0 & P_{a,r} < 0.7 \times P_{a,w} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $P_{a,s}$ 和 $\rho_{a,s}$ 分别为结算量和结算价格。

将式(5)代入式(6)得

$$P_{a,s}\rho_{a,s} = \begin{cases} 1.2P_{a,w}(\rho_{a0} + k_a P_{a,w}) & D < -0.2k_{p2}e^{k_{p1}\rho_p} \\ P_{a,r}(\rho_{a0} + k_a P_{a,w}) & -0.2k_{p2}e^{k_{p1}\rho_p} \leq D < 0 \\ P_{a,r} \times (\rho_{a0} + k_a P_{a,r}) & 0 \leq D < 0.3k_{p2}e^{k_{p1}\rho_p} \\ 0 & 0.3k_{p2}e^{k_{p1}\rho_p} < D \end{cases} \quad (7)$$

## 2 计及响应不确定性的DL调度与惩罚价格优化

### 2.1 优化目标

假设在系统出现功率缺额时,DL削减负荷,当其响应能力不足时,不足部分切除普通用户负荷。对普通用户的切负荷必然会造成其损失,需要根据切负荷量对其进行补偿。此外,补偿电价与通知用户切负荷的时间有关,越早告知用户,则用户的损失越小。因此,用于DL响应偏差所造成的切负荷需要向用户支付更多的补偿。DL参与DR所产生的费用由新能源企业、火电企业、批发侧用户承担。根据DL费用、调节偏差惩罚收益、普通用户切负荷补偿,建立目标函数为

$$\begin{aligned} \min F_1 = & \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_a} [P_{a,s,i,t}\rho_{a,s,i,t} - \rho_p(P_{a,w,i,t} - P_{a,r,i,t}) \cdot \right. \\ & \theta_{i,t} + \rho'_c (P_{a,w,i,t} - P_{a,r,i,t})\theta_{i,t}\delta_{i,t}] + \\ & \delta_{i,t}\rho_c(P_{v,t} - \sum_{i=1}^{N_a} P_{a,w,i,t}) + (\delta_{i,t} - 1) \cdot \\ & \left. P_{a,r,i,t}\rho_n \right\} \Delta t \quad (8) \end{aligned}$$

式中: $T$ 为交易时段的数量; $N_a$ 为DL用户总数; $t$ 和 $i$ 分别用来计数; $\rho_c$ 、 $\rho'_c$ 分别为由于调节负荷不足和调节偏差所造成切负荷所对应的补偿电价; $P_{v,t}$ 为 $t$ 时段调节需求量; $\theta$ 为调节情况,实际响应量大于中标量时,其值为0,反之则为1; $\delta$ 在电网功率过剩时为0,功率不足时为1; $\rho_n$ 为用户补偿费用; $\Delta t$ 为时间间隔。

为了以利益为导向,提升DL参与电力市场需求侧响应的积极性,扩大DL规模,进而提升电网的充裕度,降低系统运行压力,考虑以DL参与响应的收益为目标函数。

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_a} [C_{a,i,t} + \rho_p(P_{a,w,i,t} - P_{a,r,i,t})\theta_{i,t} - P_{a,s,i,t}\rho_{a,s,i,t}] \Delta t \quad (9)$$

以上两个目标函数分别是站在新能源企业、火电企业、批发侧用户和 DL 两个不同的角度,以实现各自利益的最大化。实际运行中可按所代表的市场主体选择目标函数,或以  $F_1$  与  $F_2$  之和为目标函数,优化总体利益。

## 2.2 约束条件

DL 调节偏差为随机变量。针对含有随机变量不等式约束,采用机会约束规划,即约束在一定的置信水平上成立。受响应不确定性影响的实际负荷调节量约束可以表示为

$$P_r(P_{a,r,i,t} \leq P_{a,i,t,\max}) \geq \alpha \quad (10)$$

式中:  $P_r$  为概率;  $\alpha$  为置信水平。

DL 的中标调节量需要小于其最大可调节量。

$$P_{a,w,i,t} \leq P_{a,i,t,\max} \quad (11)$$

可调节负荷电价、惩罚电价上下限分别为:

$$\rho_{a,i,t,\min} \leq \rho_{a,i,t} \leq \rho_{a,i,t,\max} \quad (12)$$

$$\rho_{p,\min} \leq \rho_p \leq \rho_{p,\max} \quad (13)$$

## 3 模型求解

目标函数中包含随机变量,可以将随机变量用其期望表示,进而将随机规划转化为确定性规划。将  $F_1$  拆分为几项分别求解期望,DL 收入的期望  $E$  如式(14)所示,中间变量  $m_1 \sim m_6$  由式(15)给出。

$$E(P_{a,s}\rho_{a,s}) = m_3[(\mu m_4 - 1)\Phi(m_1) + 1.2\Phi(m_6) - (0.2 + \mu m_4)\Phi(m_2)] + k_a P_{a,w}^2 m_4 \frac{a\sigma}{\sqrt{2\pi}} [(0.7m_4^{-1} - \mu)e^{-0.5m_1^2} + (\mu - m_4^{-1})e^{-0.5\mu^2\sigma^{-2}}] + \varphi^{-1} k_a m_4 P_{a,w}^2 \cdot [\Phi(\mu\sigma^{-1}) - \Phi(m_1)][m_4(\sigma^2 + \mu^2) - \mu] - m_4 m_3 \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} (e^{-0.5m_2^2} - e^{-0.5m_1^2}) \quad (14)$$

$$\begin{cases} m_1 = (\mu - 0.3k_{p2}e^{k_p\rho_p}) / \sigma \\ m_2 = (0.2k_{p2}e^{k_p\rho_p} + \mu) / \sigma \\ m_3 = \varphi^{-1}(P_{a,w}\rho_{a0} + k_a P_{a,w}^2) \\ m_4 = k_{p2}^{-1}e^{-k_p\rho_p} \\ m_5 = (\mu - D_{\max}) / \sigma \\ m_6 = (\mu - D_{\min}) / \sigma \end{cases} \quad (15)$$

DL 响应偏差和可再生能源增加收入的期望分别如式(16)、式(17)所示。

$$E[(P_{a,w} - P_{a,r})\theta] = \varphi^{-1} m_4 P_{a,w} \left\{ -\frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \times e^{\frac{(D_{\max}-\mu)^2}{2\sigma^2}} + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}} + \mu \left[ \Phi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right) - \Phi(m_5) \right] \right\} \quad (16)$$

$$E(P_{a,r}\rho_n) = \rho_n P_{a,w} \varphi^{-1} \left\{ [\Phi(m_6) - \Phi(m_5)] \cdot (1 - m_4\mu) - \frac{m_4\sigma}{\sqrt{2\pi}} (e^{-0.5m_6^2} - e^{-0.5m_5^2}) \right\} \quad (17)$$

DL 响应成本与其调节量相关,将式(5)代入式(2),得到响应成本与偏差程度之间的关系如式(18)所示。响应成本也为随机变量,其期望如式(19)所示,中间变量  $m_7 \sim m_{10}$  由式(20)给出。

$$C_a = b_1(1 - k_{p2}^{-1}e^{-k_p\rho_p}D)^2 P_{a,w}^2 + b_2(1 - k_{p2}^{-1}e^{-k_p\rho_p}D) P_{a,w} \quad (18)$$

$$E(C_a) = P_{a,w}(m_7 - m_8) [\Phi(m_5) - \Phi(m_6)] + \frac{\varphi^{-1}\sigma}{\sqrt{2\pi}} P_{a,w} m_4 [m_9 e^{-0.5m_9^2} - m_{10} e^{-0.5m_5^2}] \quad (19)$$

$$\begin{cases} m_7 = b_1 m_4^2 P_{a,w} (\sigma^2 + \mu^2) \\ m_8 = -m_4 \varphi^{-1} \mu (2b_1 P_{a,w} + b_2) + b_1 P_{a,w} + b_2 \\ m_9 = b_1 m_4 P_{a,w} (D_{\min} + \mu) - 2b_1 P_{a,w} - b_2 \\ m_{10} = b_1 P_{a,w} m_4 (D_{\max} + \mu) - 2b_1 P_{a,w} - b_2 \end{cases} \quad (20)$$

对于含有随机变量的不等式约束式(10),将式(5)代入,可将其改写为式(21),置信区间如式(22)所示。标准正态分布的累积分布函数用  $u_w$  表示,其大小表示服从标准正态分布的随机变量小于  $w$  的概率。

$$P_r[(1 - k_{p2}^{-1}e^{-k_p\rho_p}D) P_{a,w,i,t} \leq P_{a,i,t,\max}] \geq \alpha \quad (21)$$

$$\begin{cases} \frac{k_{p2}e^{k_p\rho_p}}{\sigma} - \frac{k_{p2}e^{k_p\rho_p} P_{a,i,t,\max}}{P_{a,w,i,t}\sigma} - \frac{\mu}{\sigma} \leq u_w \\ w = \Phi\left(\frac{D_{\max} - \mu}{\sigma}\right) - \alpha \end{cases} \quad (22)$$

此时,优化的目标函数和约束中不再含有随机变量,可按照常规的优化问题求解,下面算例采用内点法。

## 4 算例分析

以中国东部某省为例,该省以火电机组与光伏、风电等新能源电站参与供电。取其夏季一天研究。火电机组、新能源电站出力、总负荷和响应需求量曲线如图 3 所示。响应需求量为正表示系统中功率过剩,DL 增加用电量;反之则表示功率不足,DL 需削减负荷。

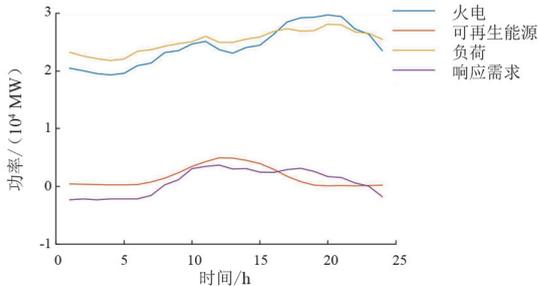


图3 火电、可再生能源、负荷和需求响应功率

将参与DR的DL按类型分为4类:第1类为响应成本相对较低、用电方式灵活的用户,例如建材、机械制造等行业,此类用户响应较为积极;第2类为响应成本较大但有一定潜力的用户,如钢铁等行业;第3类为用电方式不灵活、响应积极性较低的用户,如电子、轻工业等;第4类为普通居民用户,其响应偏差较大。

为了减小计算量,将同一类DL视为一个整体。不同类型DL的参数如表1所示,下标cut和inc分别表示DL负荷减少和增加。

表1 不同类型DL参数

参数	第1类	第2类	第3类	第4类
$\rho_{a0,cut}/(\text{元} \cdot (\text{MWh})^{-1})$	350	400	450	400
$k_{a,cut}$	0.10	0.12	0.15	0.20
$\rho_{a0,inc}/(\text{元} \cdot (\text{MWh})^{-1})$	150.000	200.000	250.000	30.933
$k_{a,inc}$	0.15	0.15	0.20	0.20
$b_1$	0.2	0.2	0.2	0.1
$b_2$	100	150	120	120
$k_{p1}$	0.33	0.33	0.33	0.33
$k_{p2}$	0.002 2	0.002 2	0.002 2	0.002 2
$\mu$	0.1	0.1	0.2	0.2
$\sigma^2$	0.10	0.15	0.20	0.30
$D_{max}$	0.3	0.3	0.5	0.6
$D_{min}$	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2

考虑DL可增加量与可削减量间的差异,绘制4类负荷各时段最大可参与响应量,如图4所示。

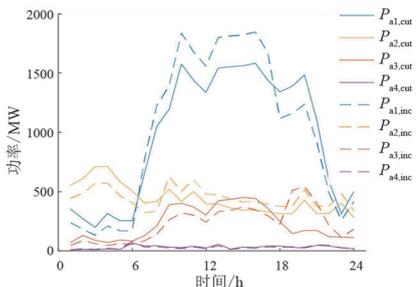


图4 DL最大响应功率

分别以 $F_1$ 和 $F_2$ 为优化目标,DL响应前后系统不平衡功率和各类DL功率分别如图5、图6所示。DL通过增加或减少其负荷来响应系统的不平衡功

率,以减小负荷的峰谷差,提高电网的稳定性。当以 $F_1$ 为优化目标时,DL在某些时段的响应量并没有达到最大值,这是由于过高的响应量所对应的价格过高,从而增加了DL的补偿成本。以 $F_2$ 为目标函数时,DL在某些时段的响应较大,即对DL来说,响应越大,收益越高。另一方面,DL调节功率受到其成本的限制,过高的响应对应较大的成本,降低了收益。

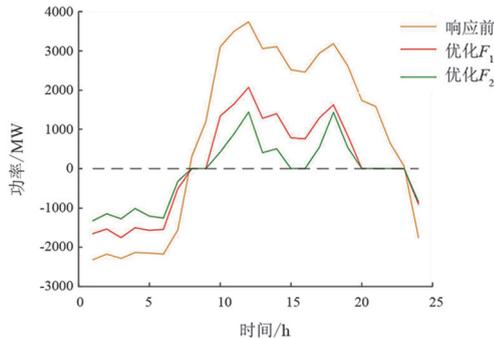


图5 响应前后不平衡功率

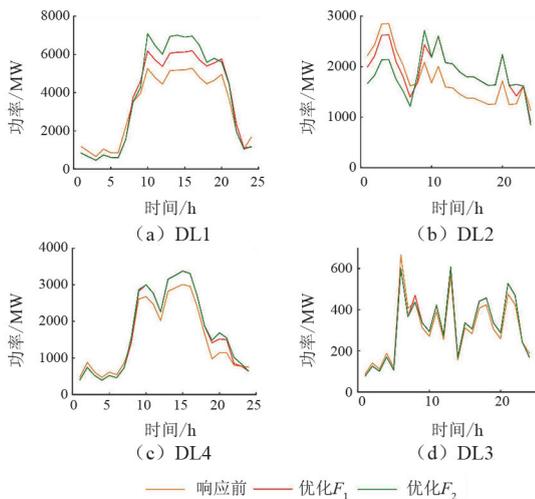


图6 DL响应前后功率

以 $F_1$ 和 $F_2$ 为优化目标时,4类DL各时段响应功率对应的价格如图7所示。在白天,可再生能源的出力较大,导致系统功率过剩。DL增加了负荷,补偿价格小于负荷减少时的补偿价格。当 $F_2$ 为优化目标时,在某些时段补偿价格高于 $F_1$ ,故DL获得的收益更多,其中第1类DL尤为明显。

在不同的优化目标下,响应偏差的惩罚价格如表2所示。以 $F_1$ 和 $F_2$ 为优化目标时,它们分别得到最小值。当以 $F_1$ 和 $F_1$ 与 $F_2$ 之和为目标函数时,惩罚价格接近上限。较高的惩罚价格可以用来补偿普通用户,并能提高DL的响应精度。对于DL来说,过高的惩罚必然会增加其响应成本,而过低的惩罚

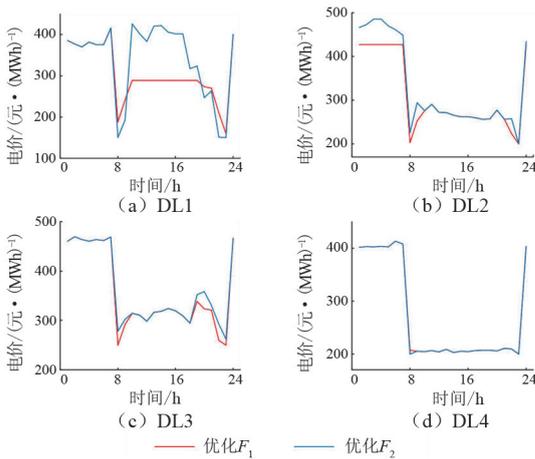


图 7 不同优化目标下补偿电价

不能约束 DL, 导致其响应偏差大, 惩罚高。综合以上两方面的影响, 在以  $F_2$  为优化目标, 惩罚价格为 666.813 元/MWh。

表 2 不同目标下优结果

优化目标	$F_1$	$F_2$	$F_1+F_2$
$\rho_p/(\text{元} \cdot (\text{MWh})^{-1})$	799.957	666.813	799.938
$F_1/\text{元}$	$6.303 \times 10^6$	$7.597 \times 10^6$	$6.640 \times 10^6$
$F_2/\text{元}$	$-5.966 \times 10^6$	$-7.823 \times 10^6$	$-7.332 \times 10^6$
$F_1+F_2/\text{元}$	$3.374 \times 10^5$	$-2.278 \times 10^5$	$-6.925 \times 10^5$

为了分析响应偏差对 DL 收入的影响, 设计以下场景: 场景 1 基于表 1 中的参数; 场景 2 在场景 1 的基础上, 将 DL 的响应偏差上限分别改为 0.2、0.2、0.4 和 0.5, 即减小 DL 的最大响应偏差, 提升其响应精度; 场景 3 在场景 1 的基础上将所有的方差乘以 0.6, 即减小其离散程度, 响应偏差程度接近期望值的概率增加。选择不同的优化目标, 3 种场景下的优化结果如图 8 所示。与场景 1 相比, 减小 DL 偏差上限和偏差的离散程度均能提高 DL 的收益。提高 DL 的响应精度可以减少对其响应偏差惩罚, 增加需求响应的费用, 但同时减小了对于普通用户的切负荷, 保障系统的稳定运行。

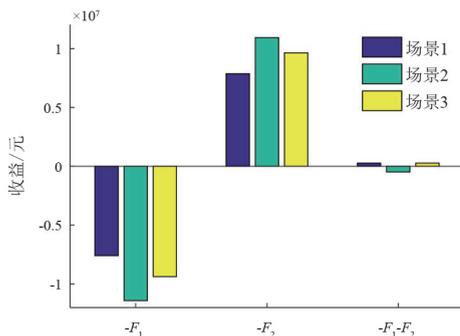


图 8 不同场景下优化结果

为了进一步定量地分析 DL 响应偏差对其收益

期望的影响, 分别将 DL 响应偏差的上限由 [0.3 0.3 0.5 0.6] 以 0.01 的步长减小至 [0.2 0.2 0.4 0.5], 以及将 DL 响应偏差的均值由 [0.1 0.1 0.2 0.2] 以 0.03 的步长减小至 [-0.2 0.2 -0.1 -0.1], 即分别减小其最大响应偏差和整体偏差程度。两种情况下优化可调度负荷收益, 各 10 组数据如表 3 所示。随着响应偏差上限的减小, DL 收益逐渐增加。随着偏差均值逐渐减小, DL 响应量大于出清量的概率增加, DL 收益增加, 但由于响应量超出 120% 的部分不参与结算, 随着均值的继续减小, DL 收益降低。

表 3 两种情况下可调度负荷收益 单位: 元

改变因数	减小响应偏差上限	减小响应偏差均值
以文中所述步长减小响应偏差	$8.182 \times 10^6$	$8.443 \times 10^6$
	$8.514 \times 10^6$	$9.065 \times 10^6$
	$8.863 \times 10^6$	$9.729 \times 10^6$
	$9.230 \times 10^6$	$1.044 \times 10^7$
	$9.619 \times 10^6$	$1.123 \times 10^7$
	$1.002 \times 10^7$	$1.212 \times 10^7$
	$1.046 \times 10^7$	$1.125 \times 10^7$
	$1.088 \times 10^7$	$1.020 \times 10^7$
	$1.139 \times 10^7$	$9.080 \times 10^6$
	$1.187 \times 10^7$	$8.344 \times 10^6$

为减小响应偏差所产生的危害, 相关监管机构可以考虑将 DL 的响应准确性作为考核指标。对于响应偏差较大的 DL, 监管机构可以采取相应措施限制其参与交易, 严重时甚至可以令其退出市场。

## 5 结 论

考虑交易价格对调节量的影响, 首次提出了响应偏差与惩罚价格之间的关系。计及可调度负荷响应的不确定性, 引入随机变量, 结合现有结算规则, 提出了计及响应不确定性的可调度负荷出清和惩罚价格的随机优化模型。优化模型采用期望模型求解, 得到以下结论:

1) DL 在系统出现功率不足时削减负荷、过剩时增加负荷, 有效地减小不平衡功率, 提高系统的灵活性, 弥补可再生能源的不足, 促进其消纳。

2) 根据不同市场主体的利益, 分别优化各 DL 在不同条件下的最优响应功率和惩罚价格。偏差惩罚一方面提高 DL 的响应精度, 另一方面降低 DL 的响应积极性。

3)以 DL 响应偏差程度作为随机变量,通过改变其概率密度函数参数,量化了降低 DL 响应不确定性对提高其利益的作用。

#### 参考文献

- [1] 杨丽君,黄凯婷,孔晓磊,等.考虑柔性负荷的并网型微电网系统容量优化配置[J].太阳能学报,2021,42(2):309-316.
- [2] 叶强,胥威汀,汪伟,等.“碳中和”愿景下的四川电力减碳路径构想[J].四川电力技术,2021,44(2):28-32.
- [3] 崔东君,和敬涵,程晓春,等.考虑可再生能源配额分配的电力零售市场设计[J].四川电力技术,2021,44(1):70-76.
- [4] 宁剑,江长明,张哲,等.可调节负荷资源参与电网调控的思考与技术实践[J].电力系统自动化,2020,44(17):1-8.
- [5] 姜婷玉,李亚平,鞠平,等.柔性负荷控制及模型研究综述[J].智慧电力,2020,48(10):1-8.
- [6] Shunlin ZHENG, Yi SUN, Bin LI, et al. Incentive-Based Integrated Demand Response for Multiple Energy Carriers Considering Behavioral Coupling Effect of Consumers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3231-3245.
- [7] 魏震波,张海涛,魏平桢,等.考虑动态激励型需求响应的微电网两阶段优化调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(19):1-10.
- [8] Andreas G VLACHOS, Pardelis N BISKAS. Demand Response in A Real-Time Balancing Market Clearing With Pay-As-Bid Pricing [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4):1966-1975.
- [9] Gianluca DORINI, Pierre PINSON, Henrik MADSEN. Chance-Constrained Optimization of Demand Response to Price Signals [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4):2072-2080.
- [10] Chaoyue ZHAO, Jianhui WANG, Jean-Paul WATSON, et al. Multi-stage robust unit commitment considering wind and demand response uncertainties[C].2014 IEEE PES General Meeting, Conference & Exposition, IEEE, 2014.
- [11] Pan LI, Hao WANG, Baosen ZHANG. A Distributed Online Pricing Strategy for Demand Response Programs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 350-360.
- [12] Mengmeng YU, Seung Ho HONG, Yumin DING, et al. An Incentive-Based Demand Response (DR) Model Considering Compositd DR Resources [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(2): 1488-1498.
- [13] 况华,沐欣欣,覃日升.基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法[J].四川电力技术,2020,43(6):49-54.
- [14] Waqqas A BUKHSH, Chunyu ZHANG, Pierre PINSON. An Integrated Multiperiod OPF Model With Demand Response and Renewable Generation Uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1495-1503.
- [15] Cuo ZHANG, Yan XU, Zhao Yang DONG, et al. Robust Coordination of Distributed Generation and Price-Based Demand Response in Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4236-4247.
- [16] Guodong LIU, Yan XU, Kevin TOMSOVIC. Bidding Strategy for Microgrid in Day-Ahead Market Based on Hybrid Stochastic/Robust Optimization [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 227-237.
- [17] 王蓓蓓,李义荣,李扬,等.考虑响应不确定性的可中断负荷参与系统备用配置的协调优化[J].电力自动化设备,2015,35(11):82-89.
- [18] Mostafa VAHEDIPOUR-Dahraie, Homa RASHIDIZADEH-Kermani, Amjad ANVARI-Moghaddam, et al. Stochastic Risk-Constrained Scheduling of Renewable-Powered Autonomous Microgrids With Demand Response Actions: Reliability and Economic Implications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1882-1895.
- [19] Mostafa VAHEDIPOUR-Dahraie, Homa RASHIDIZADEH-Kermani, Miadreza SHAFIE-Khah, et al. Risk-Averse Optimal Energy and Reserve Scheduling for Virtual Power Plants Incorporating Demand Response Programs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1405-1415.
- [20] Kai MA, Guoqiang HU, Costas J SPANOS. A Cooperative Demand Response Scheme Using Punishment Mechanism and Application to Industrial Refrigerated Warehouses [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(6): 1520-1531.
- [21] Shunlin ZHENG, Yi SUN, Bin LI, et al. Stochastic programming model for incentive-based demand response considering complex uncertainties of consumers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(20): 4488-4500.
- [22] 孙毅,刘迪,崔晓昱,等.面向居民用户精细化需求响应的等梯度迭代学习激励策略[J].电网技术,2019,43(10):3597-3605.

# 基于条件风险价值风险控制的多电源 虚拟电厂机组动态聚合优化模型

刘国新,吴杰康,蔡志宏,王瑞东,蔡锦健,张宏业  
(广东工业大学自动化学院,广东 广州 510006)

**摘要:**虚拟电厂存在源荷不确定性的问题会导致虚拟电厂在获取收益同时也要面对一定的风险损失。针对此问题,提出在日前从现有的多电源机组中选择可调容量合适的机组组建虚拟电厂,就能有效规避风险损失,使虚拟电厂的收益最大化。文中采用条件风险价值作为风险度量的指标,以运行收益最大化和风险损失最小化为优化目标,建立基于条件风险价值点(CVaR)风险控制的多电源虚拟电厂机组动态聚合优化模型。首先,采用场景技术来模拟虚拟电厂中源荷的不确定性;然后,在此基础上研究了虚拟电厂管理者的风险偏好对虚拟电厂机组选择的影响,以及环境惩罚成本和购电电价对虚拟电厂机组选择的影响;最后,通过算例仿真验证了该模型的正确性。结果表明,当虚拟电厂管理者选择合适的风险偏好时,虚拟电厂机组的动态聚合模型可有效降低虚拟电厂的风险损失以及提高虚拟电厂供能的稳定性。

**关键词:**虚拟电厂;多电源机组;动态聚合;条件风险价值;风险偏好;风险损失

中图分类号:TM 73 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)03-0008-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220302

## Dynamic Aggregation Optimization Model for Multi-source Units of VPP Based on CVaR Risk Control

LIU Guoxin, WU Jiekang, CAI Zhihong, WANG Ruidong, CAI Jinjian, ZHANG Hongye

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

**Abstract:** Virtual power plant(VPP) has the problem of generation and load uncertainty, which will lead to VPP facing risk loss while gaining profit. To solve this problem, VPP can be set up by selecting units with suitable adjustable capacity from the existing multi-source units in day-ahead, so as to effectively avoid the risk loss and maximize the revenue of VPP. In this study, conditional value-at-risk(CVaR) is used as the index of risk measurement, and the optimization goal is to maximize the operating revenue and minimize the risk loss. The dynamic aggregation optimization model of multi-source units is established based on CVaR risk control. Firstly, scenario technology is used to simulate the uncertainty of generation and load in VPP. Then, the influence of risk preference of VPP manager, environmental penalty cost and purchasing electricity price on the units selection of VPP is studied. Finally, a simulation example is given to verify the correctness of the proposed model. The result shows that the dynamic aggregation model can effectively reduce the risk loss of VPP and improve the power supply stability of VPP when the VPP manager chooses the appropriate risk preference.

**Key words:** virtual power plant; multi-source units; dynamic aggregation; conditional value-at-risk; risk preference; risk loss

## 0 引言

近年来,中国风光装机容量不断增加,但因其具

有单机容量小、地域分散、并网具有较大的随机性和波动性的特性,大规模接入会给电网的可靠性带来巨大的挑战<sup>[1]</sup>。为了有效解决利用可再生能源所带来的威胁,虚拟电厂(virtual power plant, VPP)应运而生。VPP是通过将各种分布式电源、储能系统以及可控负荷聚合成一个主体来参与电力市场运

营<sup>[2]</sup>,缓解了可再生能源接入电网造成波动的同时,还增加了 VPP 各组成部分的经济效益。

为了应对可再生能源的高渗透率,VPP 中需要配置足够的储能系统、微燃机等设备,才能有效缓解由于可再生能源的随机性所带来的威胁。所以需要 VPP 的机组配置进行深入研究,而在 VPP 的配置方面已有许多优秀的成果。有研究基于投资组合理论,充分考虑了可再生能源所存在的不确定性,以此来对 VPP 中的电源容量进行优化配置<sup>[3]</sup>;有研究针对 VPP 中含有大规模分布式光伏的场景,综合考虑 VPP 在电能质量、削峰填谷以及储能侧需求响应 3 个方面的作用,来寻找储能容量最优配置方案<sup>[4]</sup>;有研究利用条件风险价值(conditional value-at-risk, CVaR)来进行风险度量,建立了一种基于投资组合理论和计及风险量度的 VPP 容量优化配置模型<sup>[5]</sup>;还有研究针对可调资源的动态特性,建立了基于条件风险价值的 VPP 多级优化配置模型,分别从可调资源灵活性、聚合调节特性以及优化目标三方面入手<sup>[6]</sup>。上述 VPP 优化配置的研究都是基于能源设备的建设来展开的,近年来,中国在供给侧出现了电源规模过剩的问题<sup>[7]</sup>,即在同一地区有多个同类型的电力企业存在。在这种情况下,虚拟电厂的配置就没有必要从无到有进行建设,而是在现有电力企业中寻找最优的机组成员。所以,下面研究的重点内容是如何在现有的电力企业基础上,以一天为周期,通过租赁设备的方式,组建虚拟电厂,获取收益。

由于可再生能源出力的不确定性将会导致出力偏差,进而导致风险损失,为了减少风险损失,增大收益,需要对风险进行度量。有文献建立了多虚拟电厂优化调度模型,借助均值-方差理论,提出利润函数的风险刻画,准确描述不确定性的影响<sup>[8]</sup>。但传统的均值-方差模型在风险度量方面具有局限性,为了克服该局限性,有研究利用最差情境下的 CVaR 方法构建了运行成本、售电收益和交互收益在内的虚拟电厂能量市场的收益-风险模型<sup>[9]</sup>;也有研究引入 CVaR 理论量化和置信度方法,转化目标函数和约束条件中的随机变量,建立随机调度优化模型<sup>[10]</sup>。CVaR 模型能够充分反映决策结果的潜在损失,而且决策收益是否符合对称分布并不会影响模型对风险的度量<sup>[11]</sup>,凭借该优势,CVaR 在电力系统风险管理方面已成为一种有效的风险度量方式。

针对上述问题,下面提出一种基于 CVaR 理论的虚拟电厂多电源动态聚合模型。首先,使用 CVaR 对风险进行度量;其次,用风险偏好系数来模拟虚拟电厂管理者对风险的厌恶程度;然后,用场景集的方法模拟风、光、负荷的不确定性;最后,在已有的机组中选择最适合的机组组成虚拟电厂来获取较高的收益。在优化过程中还考虑了虚拟电厂对环境保护的作用,以及购电电价的变化对虚拟电厂机组选择的影响,并给出了算例进行验证。

## 1 VPP 机组的 CVaR 风险控制原理

风速、光照强度以及负荷都存在不确定性,会给 VPP 的机组选择带来风险损失,所以需要对风险进行度量,以求减少风险损失。风险价值(value-at-risk, VaR)和 CVaR 是当前常用的风险管理方法,可以有效弥补均值-方差这种传统方法在进行风险度量时的局限性。风险价值的计算方法有随机模拟法和历史数据模拟法等<sup>[12]</sup>,由于风速、光照强度以及负荷的概率分布难以准确获得,所以采用历史数据模拟法来计算风险价值。

采用场景集的方法将随机性优化问题转化为确定性优化问题处理<sup>[13]</sup>。考虑风速、光照强度以及负荷的场景集为  $w = \{q(w_x), x=1, \dots, n_{wpp}\}$ 、 $p = \{q(p_c), c=1, \dots, n_{pv}\}$ 、 $l = \{q(l_v), v=1, \dots, n_{load}\}$ ,其中: $q(w_x)$ 、 $q(p_c)$ 、 $q(l_v)$ 分别为风速场景  $w_x$ 、光照强度场景  $p_c$ 、负荷场景  $l_v$  的发生概率; $n_{wpp}$ 、 $n_{pv}$ 、 $n_{load}$ 分别为对应场景中各场景的个数。

选用 CVaR 作为风险指标,对 CVaR 理论的介绍如下:

假设 VPP 的损失函数为  $f(G, y)$ ,取 VPP 收益的负值,则损失函数  $f(G, y)$  不大于边界值  $\alpha$  的分布函数为

$$\psi(G, \alpha) = \int_{f(G, y) \leq \alpha} p(y) dy \quad (1)$$

式中: $y$ 为随机向量, $y = [g_{wpp} \ g_{pv} \ g_l]$ ,风速  $g_{wpp}$ 、光照强度  $g_{pv}$ 、负荷  $g_l$ 为随机变量; $p(y)$ 为  $y$  的联合概率密度函数; $G$ 为决策向量, $G = [g_{VPP,1} \ g_{VPP,2} \ \dots \ g_{VPP,m} \ \dots \ g_{VPP,M}]$ , $g_{VPP,m}$ 为模型中的第  $m$  个决策变量,共有  $M$  个决策变量; $\psi(G, \alpha)$ 为决策向量  $G$  的累计损失分布函数,且  $\psi(G, \alpha)$ 是关于  $\alpha$  右连续和非递减的函数<sup>[14]</sup>;  $\alpha$ 为

虚拟电厂某种机组组合运行损失的临界值,用以判断虚拟电厂整体风险状况。

对于给定的置信度  $\beta$ , VaR、CVaR 的计算公式为:

$$V_{\text{VaR},\beta}(G) = \min\{\alpha \in R: \psi(G, \alpha) \geq \beta\} \quad (2)$$

$$V_{\text{CVaR},\beta}(G) = \frac{1}{1-\beta} \cdot \int_{f(G,y) \geq V_{\text{VaR},\beta}(G)} f(G,y) p(y) dy \quad (3)$$

式中:  $\beta$ 、 $V_{\text{VaR},\beta}(G)$ 、 $V_{\text{CVaR},\beta}(G)$  分别为虚拟电厂某种机组组合运行的置信度、VaR 值、CVaR 值。

VaR 值可以在特定的置信度下估计 VPP 某种机组组合的最大可能风险损失,但是不能考虑“尾部风险”<sup>[15]</sup>而导致风险损失被低估,而 CVaR 值可以克服这个问题,所以  $V_{\text{CVaR},\beta}(G)$  估计的风险损失大于  $V_{\text{VaR},\beta}(G)$  估计的风险损失。 $V_{\text{VaR},\beta}(G)$  的解析表达式很难直接得到,因此推导出变换函数  $F_{\beta}(G, \alpha)$  替换  $V_{\text{CVaR},\beta}(G)$  计算 CVaR 值<sup>[15]</sup>。

$$F_{\beta}(G, \alpha) = \alpha + \frac{1}{1-\beta} \int [f(G, y) - \alpha]^+ p(y) dy \quad (4)$$

式中,  $[f(G, y) - \alpha]^+$  表示  $\max\{[f(G, y) - \alpha], 0\}$ 。

式(4)难以直接求解,通常会采用随机向量  $y$  的历史样本数据,或者通过拉丁超立方抽样模拟样本数据来估计公式(4)的积分项。假设  $y_1, y_2, \dots, y_N$  为随机向量  $y$  的  $N$  个样本值,则式(4)可以变为式(5)。

$$\hat{F}_{\beta}(G, \alpha) = \alpha + \frac{1}{N(1-\beta)} \sum_{n=1}^N [f(G, y_n) - \alpha]^+ \quad (5)$$

式中:  $\hat{F}_{\beta}(G, \alpha)$  为  $F_{\beta}(G, \alpha)$  的估计值;  $y_n$  为  $y$  的第  $n$  个样本,一共有  $N$  个样本。

## 2 VPP 机组动态聚合优化模型

VPP 中存在多种电源机组,如风电机组、光伏机组、微燃机、储能系统等。可再生能源机组的出力受环境影响,存在不确定性。VPP 管理者需对风险进行评估,在众多机组中选择最能创造价值的机组,使 VPP 的运行收益最高,所面临的风险损失最低。在选择过程中需要充分考虑常规电源与可再生能源的协同运行问题。假设只考虑一个 VPP 的动态聚合,而 VPP 可选择的机组只有风电机组、光伏机组、微燃机、储能系统。

### 2.1 VPP 的机组与功效

#### 1) 风电机组

自然风风速的不确定性导致了风电机组输出功率的不确定性,风电机组的输出功率为<sup>[16]</sup>

$$P_{\text{WPP}}(t) = \begin{cases} 0, & 0 < v_t < v_{\text{in}} \cup v_t > v_{\text{out}} \\ (v_t - v_{\text{in}})(v_r - v_{\text{in}})g_r, & v_{\text{in}} \leq v_t \leq v_r \\ g_r, & v_r \leq v_t \leq v_{\text{out}} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_{\text{WPP}}(t)$  为风电机组在  $t$  时刻的输出功率;  $v_t$  为在  $t$  时刻的自然风风速;  $v_{\text{in}}$ 、 $v_{\text{out}}$  分别为切入风速与切出风速;  $v_r$  为额定风速;  $g_r$  为额定输出功率。

#### 2) 光伏机组

光照强度的不确定性导致了光伏机组输出功率的不确定性,光伏机组的输出功率为<sup>[17]</sup>

$$P_{\text{PV}}(t) = \eta_{\text{PV}} S_{\text{PV}} \theta_t \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{PV}}(t)$  为光伏机组在  $t$  时刻的输出功率;  $\eta_{\text{PV}}$  为光伏板的光电转换效率;  $S_{\text{PV}}$  为光伏板的面积;  $\theta_t$  为在  $t$  时刻的光照强度。

#### 3) 微燃机

在 VPP 中通常会配置微燃机来平抑可再生能源出力的波动性,从而对外输出稳定的电能,和常规电厂行使一样的职能。

#### 4) 储能系统

储能系统也能够平抑可再生能源出力的波动性,只是受价格的限制,不能替代微燃机在 VPP 中的作用。储能系统还能起到削峰填谷的作用,使 VPP 获得更高的收益。

### 2.2 VPP 的运行收益与成本

#### 1) 虚拟电厂的购售电收益

$$F_1 = \sum_t [\lambda_s(t) P_{\text{VPP},s}(t) - \lambda_b(t) P_{\text{VPP},b}(t)] \quad (8)$$

式中:  $P_{\text{VPP},s}(t)$ 、 $P_{\text{VPP},b}(t)$  分别为虚拟电厂在  $t$  时刻向电力负荷售电量和向电网购电量;  $\lambda_s(t)$ 、 $\lambda_b(t)$  分别为虚拟电厂在  $t$  时刻售电价格和购电价格。

#### 2) 虚拟电厂的环境惩罚成本

$$F_2 = \sum_t \sum_k \sum_f x_{\text{MT},k} m_k(f) [V_k(f) + Y_k(f)] P_{\text{MT},k}(t) \quad (9)$$

式中:  $x_{\text{MT},k}$  为微燃机组  $k$  的 0/1 变量,该机组被虚拟电厂租赁取值为 1,该机组未被虚拟电厂租赁取值为 0;  $P_{\text{MT},k}(t)$  为微燃机组  $k$  在  $t$  时刻的功率;  $f$  为微燃机排放污染物的种类;  $m_k(f)$ 、 $V_k(f)$ 、 $Y_k(f)$  分别为微燃机组  $k$  的第  $f$  种污染物的排放量、环境价值、罚

款数量级。

### 3) 虚拟电厂弃风弃光的惩罚成本

$$F_3 = \sum_t \lambda_s(t) P_{\text{curt}}(t) \quad (10)$$

式中:  $P_{\text{curt}}(t)$  为虚拟电厂在  $t$  时刻弃风弃光的功率;  $\lambda_s(t)$  为虚拟电厂在  $t$  时刻弃风弃光的惩罚成本,即虚拟电厂在  $t$  时刻的购电价格。

### 4) 虚拟电厂所选机组的租赁成本

$$F_4 = \sum_t \left\{ \sum_i x_{\text{PV},i} P_{\text{PV},i}(t) C_{\text{PV},i} + P_{\text{IL}}(t) C_{\text{IL}} + \sum_j x_{\text{WPP},j} P_{\text{WPP},j}(t) C_{\text{WPP},j} + \sum_k x_{\text{MT},k} P_{\text{MT},k}(t) \cdot C_{\text{MT},k} + \sum_e x_{\text{ESS},e} [P_{\text{ESS},e,c}(t) + P_{\text{ESS},e,d}(t)] C_{\text{ESS},e} \right\} \quad (11)$$

式中:  $x_{\text{PV},i}$ 、 $x_{\text{WPP},j}$ 、 $x_{\text{MT},k}$ 、 $x_{\text{ESS},e}$  分别为光伏机组  $i$ 、风电机组  $j$ 、微燃机组  $k$ 、第  $e$  台储能系统的 0/1 变量,该机组被虚拟电厂租赁取值为 1,该机组未被虚拟电厂租赁取值为 0;  $P_{\text{ESS},e,c}(t)$ 、 $P_{\text{ESS},e,d}(t)$  分别为第  $e$  台储能系统在  $t$  时刻的充电、放电功率;  $P_{\text{IL}}(t)$  为虚拟电厂中可中断负荷在  $t$  时刻的功率;  $C_{\text{PV},i}$ 、 $C_{\text{WPP},j}$ 、 $C_{\text{MT},k}$ 、 $C_{\text{ESS},e}$  分别为光伏机组  $i$ 、风电机组  $j$ 、微燃机组  $k$ 、第  $e$  台储能系统的单位输出功率的租赁费用;  $C_{\text{IL}}$  为可中断负荷单位电量的补偿成本。

### 5) 虚拟电厂所选机组的运行维护成本

$$F_5 = \sum_t \left\{ \sum_k x_{\text{MT},k} P_{\text{MT},k}(t) C_{\text{MT},k,\text{op}} + \sum_{e=1} x_{\text{ESS},e} \cdot [P_{\text{ESS},e,c}(t) + P_{\text{ESS},e,d}(t)] C_{\text{ESS},e,\text{op}} \right\} \quad (12)$$

式中,  $C_{\text{MT},k,\text{op}}$ 、 $C_{\text{ESS},e,\text{op}}$  分别为微燃机组  $k$ 、第  $e$  台储能系统的单位输出功率的运行费用。

### 6) 虚拟电厂的 CVaR

$$F_6 = \alpha + \frac{1}{N(1-\beta)} \sum_{n=1}^N R_n \quad (13)$$

式中:  $\alpha$  为 VaR 的边界值;  $\beta$  为预先设定的置信度<sup>[10]</sup>,取 0.9;  $R_n$  为虚拟变量,  $R_n = [f(G, y_n) - \alpha]^+$  为超过 VaR 的损失,损失函数  $f(G, y)$  取 VPP 收益的负值。

综上所述,考虑 CVaR 的虚拟电厂多电源机组动态聚合模型的目标函数包含 2 个部分,第 1 部分为虚拟电厂的运行收益,第 2 部分为 CVaR 与权重系数的乘积。

$$\text{Max} F = \sum_{n=1}^N \gamma_n (F_{1,n} - F_{2,n} - F_{3,n} - F_{4,n} - F_{5,n}) + L F_6 \quad (14)$$

式中:  $\gamma_n$  为场景  $n$  的发生概率;  $L$  为权重系数,表示

VPP 管理者的风险偏好,  $L \geq 0$ 。当  $L$  取较小的值时,管理者的选择比较激进,希望获取较高的收益,但同时会面对较大的风险损失;当  $L$  取较大的值时,管理者选择比较保守,获取的收益较低,但同时会面对的风险损失较小。VPP 的运行约束条件为:

#### ① 微燃机运行约束

$$P_{\text{MT},k,\text{min}} \leq P_{\text{MT},k}(t) \leq P_{\text{MT},k,\text{max}} \quad (15)$$

$$R_{\text{MT}}^- \leq P_{\text{MT},k}(t) - P_{\text{MT},k}(t-1) \leq R_{\text{MT}}^+ \quad (16)$$

式中:  $P_{\text{MT},k}(t)$ 、 $P_{\text{MT},k}(t-1)$  分别为微燃机组  $k$  在  $t$  时刻、 $t-1$  时刻的功率;  $P_{\text{MT},k,\text{min}}$ 、 $P_{\text{MT},k,\text{max}}$  分别为微燃机组  $k$  的最小、最大输出功率;  $R_{\text{MT}}^-$ 、 $R_{\text{MT}}^+$  分别为微燃机组  $k$  的向下、向上爬坡功率。

#### ② 储能系统的荷电状态和充、放电约束

$$S_e(t) = S_e(t-1) + \eta_c P_{\text{ESS},e,c}(t) - \frac{P_{\text{ESS},e,d}(t)}{\eta_d} \quad (17)$$

$$(1 - C_D) S_{e,\text{max}} \leq S_e(t) \leq S_{e,\text{max}} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{\text{ESS},e,c}(t) \leq u_c(t) P_{\text{ESS},e,c,\text{max}} \quad (19)$$

$$0 \leq P_{\text{ESS},e,d}(t) \leq u_d(t) P_{\text{ESS},e,d,\text{max}} \quad (20)$$

$$u_c(t) + u_d(t) \leq 1 \quad (21)$$

式中:  $S_e(t)$ 、 $S_e(t-1)$  分别为第  $e$  台储能系统在  $t$  时刻、 $t-1$  时刻的荷电状态;  $S_{e,\text{max}}$  为第  $e$  台储能系统荷电状态的上限值;  $C_D$  为储能系统的最大放电深度;  $P_{\text{ESS},e,c}(t)$ 、 $P_{\text{ESS},e,d}(t)$  分别为第  $e$  台储能系统在  $t$  时刻的充电、放电功率;  $P_{\text{ESS},e,c,\text{max}}$ 、 $P_{\text{ESS},e,d,\text{max}}$  分别为第  $e$  台储能系统的最大允许充电、最大允许放电功率;  $\eta_c$ 、 $\eta_d$  分别为储能系统的充电、放电效率系数;  $u_c(t)$ 、 $u_d(t)$  分别为储能系统在  $t$  时刻是否处于充电、放电的状态值,是则取 1,否则取 0,两者不可以同时为 1。

#### ③ 可中断负荷约束

$$0 \leq P_{\text{IL}}(t) \leq k_{\text{IL}} P_L(t) \quad (22)$$

式中:  $P_L$  为虚拟电厂中的电力负荷;  $k_{\text{IL}}$  为虚拟电厂中电力负荷中的可中断负荷的比例系数。

#### ④ 功率平衡约束

$$\sum_i x_{\text{PV},i} P_{\text{PV},i}(t) + \sum_j x_{\text{WPP},j} P_{\text{WPP},j}(t) + P_{\text{IL}}(t) + \sum_e x_{\text{ESS},e} P_{\text{ESS},e,d}(t) + P_{\text{VPP},b}(t) + \sum_k x_{\text{MT},k} P_{\text{MT},k}(t) = P_{\text{VPP},s}(t) + \sum_e x_{\text{ESS},e} P_{\text{ESS},e,c}(t) + P_L(t) + P_{\text{curt}}(t) \quad (23)$$

#### ⑤ 备用容量约束

为了克服运行优化过程中不确定因素的影响,

需预先设置备用容量约束,具体的约束公式为:

$$\sum_k x_{MT,k} [P_{MT,k,max} - P_{MT,k}(t)] + P_{IL}(t) + \sum_e x_{ESS,e} [P_{ESS,e,d,max} - P_{ESS,e,d}(t)] \geq R^+(t) \quad (24)$$

$$\sum_k x_{MT,k} [P_{MT,k}(t) - P_{MT,k,min}] + \sum_{e=1} x_{ESS,e} \cdot [P_{ESS,e,c,max} - P_{ESS,e,c}(t)] \geq R^-(t) \quad (25)$$

式中: $R^+(t)$ 为 VPP 在  $t$  时刻所需要的上旋转备用容量; $R^-(t)$ 为 VPP 在  $t$  时刻所需要的下旋转备用容量。

⑥ CVaR 风险约束

为了方便求解,将虚拟变量  $R_n$  进行松弛处理。

$$R_n \geq 0 \quad (26)$$

$$R_n \geq - (F_1 - F_2 - F_3 - F_4 - F_5) - \alpha \quad (27)$$

### 3 算例仿真与分析

#### 3.1 模型参数及求解方法

虚拟电厂动态聚合模型的原理如图 1 所示。为验证所建模型的可行性,设定 VPP 的机组选择有 4 台微燃机、4 台风电机组、4 台光伏机组、4 台储能系统。每台机组的额定容量如表 1 所示。表 2 列出了微燃机污染物排放量、环境价值以及惩罚数量级<sup>[18]</sup>。VPP 的购售电价格如图 2 所示。算例选取过去夏季典型日的风速、光照强度、负荷历史数据,采用拉丁超立方抽样,分别从根据历史数据随机生成的 5000 个场景中抽取最有可能发生的 2 个场景,作为风速、光照强度、负荷场景集  $w$ 、 $p$ 、 $l$  里的不同场景,即  $n_{wpp} = n_{pv} = n_{load} = 2$ ,各场景的发生概率为 0.50。分别对这 3 个场景集中的 2 个场景依次进行排列组合,则总场景数为  $n_{wpp}n_{pv}n_{load} = 8$  个,通过场景来模拟 VPP 中可再生能源出力与负荷的不确定性。所研究的各机组租赁成本、运行成本等其他参数可参考文献[19-20],这里不再赘述。

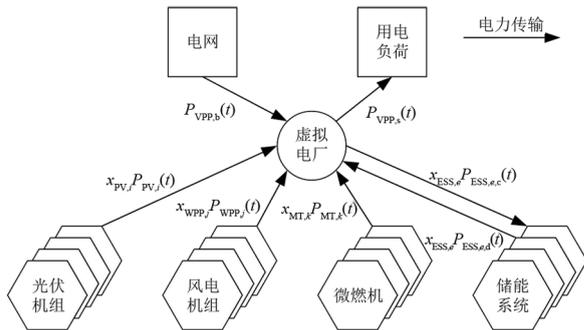


图 1 虚拟电厂动态聚合原理

表 1 VPP 中机组额定容量数据 单位: MWh

机组	额定容量	机组	额定容量
微燃机 M1	1.58	光伏 P1	0.14
微燃机 M2	0.40	光伏 P2	0.27
微燃机 M3	0.79	光伏 P3	0.40
微燃机 M4	1.32	光伏 P4	0.53
风电 W1	0.27	储能 E1	0.20
风电 W2	0.53	储能 E2	0.14
风电 W3	1.32	储能 E3	0.53
风电 W4	0.40	储能 E4	0.27

表 2 微燃机发电污染物数据

污染物	排放量/ (kg · (MWh) <sup>-1</sup> )	环境价值/ (元 · kg <sup>-1</sup> )	惩罚数量级/ (元 · kg <sup>-1</sup> )
NO <sub>x</sub>	4.331	0.487 5	0.650 0
CO <sub>2</sub>	232.040	0.650 0	0.162 5
CO	2.320	0.001 8	0.000 8
SO <sub>2</sub>	0.464	0.081 3	0.013 0

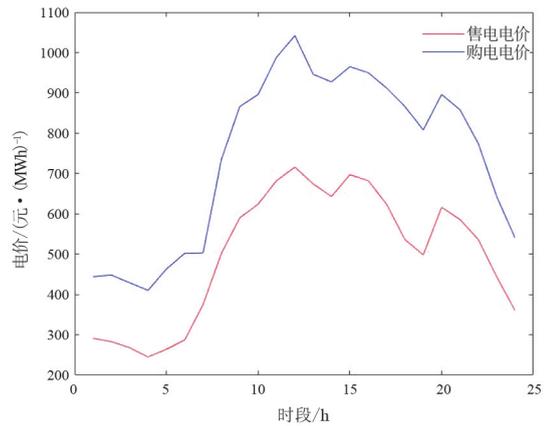


图 2 虚拟电厂购售电价

所建立的优化模型为典型的混合整数线性规划问题,可以在 GAMS 平台上 GUROBI 求解器进行求解。

#### 3.2 算例结果与分析

##### 3.2.1 风险系数对机组组合策略的影响

VPP 管理者选择不同的风险偏好系数, VPP 的机组组合优化结果如表 3 所示。可以明显看出,随着风险偏好系数  $L$  的不断增大,即 VPP 的管理者对风险的厌恶程度不断增加,则 VPP 的机组组合规划越来越偏向于保守,所以 VPP 的运行收益不断降低,而 CVaR 值也不断减少,所面临的风险也随之降低。

针对不同的  $L$  值, VPP 会获得不同的收益以及面对不同的风险损失,进而得到不同的 VPP 机组组合结果。当  $L$  值较小时, VPP 管理者的选择相对激进,优化结果为选择接入大量的可再生能源机组来

获得较高的收益,由于可再生能源出力存在不确定性,所以获得较高收益的同时也面临着较高的风险损失;当  $L$  值较大时,VPP 管理者的选择相对保守,优化结果为选择接入少量的可再生能源机组,通过接入较多的微燃机与购电的方式来满足大部分负荷,虽然获得的利益较低,但是所面临的风险损失较低。一般认为  $L$  值小于 0.10 为较小, $L$  值大于 0.50 为较大<sup>[5]</sup>。

为了充分验证  $L$  值对 VPP 动态聚合的影响,设置  $L$  的取值范围为 [0.10,1.30],取值间隔为 0.10,额外增加设置  $L=0.05$ 。通过仿真可得到在不同  $L$  值下 VPP 的总收益关于 CVaR 的有效前沿曲线,如图 3 所示。

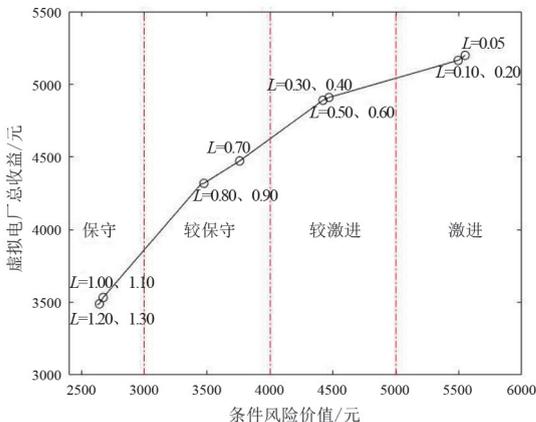


图 3 VPP 收益与 CVaR 的有效前沿曲线

如图 3 所示,可以根据风险偏好系数,将 VPP 管理者对于风险的偏好分为 4 种情况,分别为保守型、较保守型、较激进型、激进型。下面分别选取代表 4 种机组组合选择策略的风险偏好系数: $L=0.05$  表示 VPP 管理者为激进型; $L=0.50$  表示 VPP 管理者为较激进型; $L=0.80$  表示 VPP 管理者为较保守型; $L=1.30$  表示 VPP 管理者为保守型。

下面分别列出  $L=0.05$ 、 $L=0.50$ 、 $L=0.80$ 、 $L=1.30$  时,虚拟电厂机组选择结果、收益以及 CVaR 值,如表 3 所示,表中括号内数据为接入的机组编号(下同)。

表 3 虚拟电厂机组选择结果

$L$	VPP 收益/元	CVaR/元	风电机组/台	光伏机组/台	微燃机/台	储能系统/台
0.05	5199	5550	4	4	1(M3)	2(E1,E4)
0.50	4901	4448	2(W2,W3)	4	1(M3)	2(E1,E4)
0.80	4319	3474	2(W2,W3)	2(P3,P4)	2(M2,M3)	1(E1)
1.30	3484	2623	1(W3)	2(P3,P4)	2(M2,M3)	1(E1)

图 3 中出现了  $L$  值不相同但虚拟电厂的总收益

和条件风险价值却相同的情况。这是因为仿真时所设定的可选择机组有限,所以即便  $L$  值发生变化,但得到的结果是当前的机组组合仍是最优的组合。在现实中可以选择的机组较多,则该种情况不会发生,而且所得到的 VPP 收益与 CVaR 的有效前沿曲线会更加平整光滑。

### 3.2.2 VPP 环境成本灵敏度分析

对污染物排放惩罚成本进行灵敏度分析,假设 VPP 管理者的风险偏好系数  $L$  值设为 0.50,通过改变环境惩罚成本,得到如表 4 所示的机组组合结果。

表 4 不同环境成本下 VPP 机组选择结果

场景	风电机组/台	光伏机组/台	微燃机/台	储能系统/台
不考虑环境成本	2(W2,W3)	2(P3,P4)	2(M2,M3)	1(E4)
考虑环境成本	2(W2,W3)	4	1(M3)	2(E1,E4)
环境成本提高到 2 倍	4	4	0	3(E1,E2,E4)

当不考虑微燃机的环境惩罚成本时,VPP 中机组选择为微燃机、风电机组、光伏机组各 2 台,储能系统 1 台。此时的 VPP 多使用微燃机进行出力发电,并未有效利用可再生能源,排放的污染物较多,环境污染严重。

当考虑微燃机的环境惩罚成本时,VPP 在机组选择中减少微燃机的接入台数,提高了光伏机组和储能系统的接入台数,用可再生能源来弥补微燃机的出力,并优先使用储能系统来平抑可再生能源的出力波动。此时,VPP 处于既经济又环保还高效的状态。

当把微燃机的环境惩罚成本提高到 2 倍时,VPP 的机组选择中并没有微燃机接入,转而接入更多的风电机组和储能系统,用可再生能源与储能系统来弥补微燃机的出力,充分体现了 VPP 对环境的保护作用。

通过以上分析,可以看出国家制定的环境政策会影响 VPP 的机组选择,为了响应节能减排的号召,VPP 的机组选择会向能源转型、提升可再生能源渗透率的方向发展。

### 3.2.3 VPP 购电电价灵敏度分析

假设 VPP 管理者的风险偏好系数  $L$  值设为 0.50,通过改变购电电价进行灵敏度分析,得到如表 5 所示的机组组合结果。

当购电电价减少 50%时,VPP 中机组选择为风电机组 1 台、光伏机组 3 台,微燃机与储能系统皆为

表 5 不同购电电价下 VPP 机组选择结果

场景	风电机组/ 台	光伏机组/ 台	微燃机/ 台	储能系统/ 台
购电电价减少 50%	1(W3)	3(P1,P3,P4)	0	0
正常购电电价	2(W2,W3)	4	1(M3)	2(E1,E4)
购电电价提高到 2 倍	1(W3)	3(P1,P2,P4)	1(M1)	1(E1)

0 台。此时的 VPP 主要通过以低电价购电维持 VPP 的内部运营,所以接入较少的能源机组。

当购电电价提高到正常购电电价时,VPP 更倾向于使用可再生能源,提高了风电机组和光伏机组的接入,以及接入微燃机和储能系统补偿剩余电负荷、提供旋转备用服务,增加了机组的接入台数。

当购电电价提高到 2 倍时,VPP 管理者为了有效降低因风光不确定性带来的弃风弃光高额惩罚成本,选择接入较少的风电机组和光伏机组。为了维持 VPP 的内部运营,选择接入高功率微燃机,所以接入的机组也相对较少。

通过以上分析,可以看出购电电价会影响 VPP 的机组选择;使用过高或过低的购电电价都会使 VPP 选择接入较少的机组,加剧了电源规模过剩的问题;使用正常的购电电价,VPP 会选择接入较多的机组,缓解电源规模过剩问题的同时,提高可再生能源的利用率。

### 3.2.4 VPP 出力计划分析

VPP 作为一个发电厂,可以根据 VPP 内的机组出力拟定日前调度计划。在所建模型中,当 VPP 管理者确定风险偏好系数后,就可以得到最优的机组选择组合,再根据这个组合的机组出力,给出 VPP 日前出力计划。

选取一个夏季典型日作为仿真对象,假设 VPP 管理者的风险偏好系数  $L$  值为 0.50,以此选择最优的机组组合,组合中包括 2 台风电机组(W2、W3)、4 台光伏机组、1 台微燃机(M3)、2 个储能系统(E1、E4)。负荷需求以及可再生能源出力如图 4 所示,VPP 的日前出力计划如图 5 所示,分时段分析如下:

0:00—5:00:电价较低,可再生能源出力较少,只能满足小部分的负荷需求;VPP 优先调度 M3 进行放电,以此来满足大部分的负荷需求;由于电价比较低以及微燃机的环境成本比较高,选择购入部分电量并调度可中断负荷,以此来满足剩余的负荷需求,并对 E1、E4 进行充电。

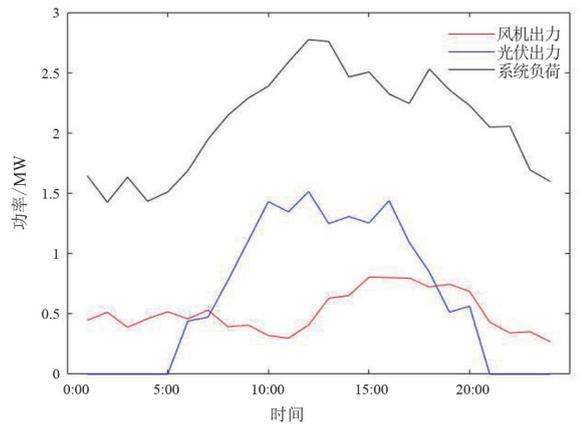
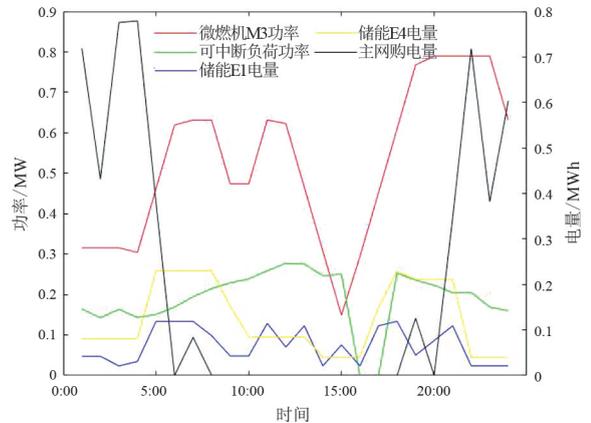


图 4 负荷需求及可再生能源出力

图 5 VPP 日出力计划 ( $L = 0.50$ )

5:00—12:00:电价较高,可再生能源出力较多,可以满足大部分的负荷需求;VPP 优先调度充电后的 E1、E4 进行放电,以此来满足部分的负荷需求;由于电价比较高,选择少购入或不购入电量,直接调度 M3 以及可中断负荷,以此来满足剩余的负荷需求。

12:00—19:00:电价较高,可再生能源出力多,可以基本满足负荷的需求;由于电价比较高,选择少购入或不购入电量;VPP 调度 M3 进行放电以及可中断负荷就可以满足剩余的负荷需求,由于剩余的负荷需求少,M3 和可中断负荷的出力处于较低水平就可以完全满足,并对 E1、E4 进行充电。

19:00—24:00:电价较低,可再生能源出力较少,只能满足小部分的负荷需求;VPP 优先调度 M3 进行放电,以此来满足大部分的负荷需求;由于电价比较低,选择购入部分的电量,并调度充电后的 E1、E4 进行放电以及可中断负荷,以此来满足剩余的负荷需求。

## 4 结 论

针对含风、光、微、储的 VPP 多电源机组选择的问题,建立了基于 CVaR 理论的 VPP 多电源机组动态聚合模型,研究得到以下结论:

1)通过 CVaR 对风险损失的度量以及 VPP 管理者对风险的容忍程度,可以在众多机组中选择最合适的机组,获取较高的收益以及面对较低的风险损失;

2)随着风险偏好系数的增大,优化结果会将存在风险的因素减少,即将风电机组、光伏机组的数量减少;

3)政府所制定的环境政策对 VPP 的机组选择有较大的影响,即减少微燃机的数量,响应政府节能减排号召;

4)购电电价的变化对 VPP 的机组选择也有较大的影响,制定合适的购电电价可有效提高可在生能源的利用率,缓解电源规模过剩问题。

此外,这里只考虑了一个 VPP 的机组选择,而现实中是多个 VPP 同时存在,所以后续工作可以在此基础上考虑多个 VPP 共存的机组选择问题。

### 参考文献

[1] 王宣元,刘敦楠,刘蓁,等.泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J].电网技术,2019,43(9):3175-3183.

[2] Ali Ghahgharaee Zamani, Alireza Zakariazadeh, Shahram Jadid. Day-ahead resource scheduling of a renewable energy based virtual power plant [J]. Applied Energy, 2016,169(45):324-340.

[3] 黄昕颖,黎建,杨莉,等.基于投资组合的虚拟电厂多电源容量配置[J].电力系统自动化,2015,39(19):75-81.

[4] 韦立坤,赵波,吴红斌,等.虚拟电厂下计及大规模分布式光伏的储能系统配置优化模型[J].电力系统自动化,2015,39(23):66-74.

[5] 卫志农,陈好,黄文进,等.考虑条件风险价值的虚拟电厂多电源容量优化配置模型[J].电力系统自动化,2018,42(4):39-46.

[6] 李翔宇,赵冬梅.计及可调资源动态特性的虚拟电厂多级优化配置[J].电力系统自动化,2020,44(13):17-24.

[7] 王睿卓,刘怀东,崔丽瑶,等.计及综合效率评价的火-风-储-高载能企业虚拟电厂成员选择模型[J].电网技术,2021,45(5):1942-1951.

[8] 杨洪朝,杨迪,孟科.高比例可再生能源渗透下多虚拟电厂多时间尺度协调优化调度[J].智慧电力,2021,49(2):60-68.

[9] 张江林,夏榆杭,段登伟,等.基于 WCVaR 评估的虚拟发电厂能量市场收益——风险模型[J].电力系统自动化,2017,41(9):77-83.

[10] 徐辉,焦扬,蒲雷,等.计及不确定性和需求响应的风光燃储集成虚拟电厂随机调度优化模型[J].电网技术,2017,41(11):3590-3597.

[11] 杨佳澄,翟晓鹤,谭忠富,等.基于相对鲁棒 CVaR 的高不确定性机组日前竞价申报优化[J].电网技术,2021,45(11):4366-4376.

[12] S URYASEV. Conditional value-at-risk: optimization algorithms and applications [C] // Proceedings of the IEEE/IAFE/INFORMS 2000 Conference on Computational Intelligence for Financial Engineering (CIFEr) (Cat. No.00TH8520), IEEE, 2002.

[13] 吴乐川,于群.基于场景分析的风光储协调的配电网动态无功优化[J].山东农业大学学报(自然科学版),2020,51(1):102-105.

[14] Sung-won PARK, Y-G PARK, Sung-Yong SON. Local-generator-based virtual power plant operation algorithm considering operation time [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2017,12(6):2127-2137.

[15] 黄友珀,唐振鹏,周熙雯.基于偏  $t$  分布 realized GARCH 模型的尾部风险估计[J].系统工程理论与实践,2015,35(9):2200-2208.

[16] 李红霞,樊伟,李楠,等.考虑风光不确定性的电气互联虚拟电厂近零碳调度优化模型[J].电力建设,2020,41(9):10-19.

[17] 李凌昊,邱晓燕,张浩禹,等.电力市场下的虚拟电厂风险厌恶模型与利益分配方法[J].电力建设,2021,42(1):67-75.

[18] 钱科军,袁越,石晓丹,等.分布式发电的环境效益分析[J].中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.

[19] Mehran JAFARI, Asghar Akbari FOROUD. A medium/long-term auction-based coalition-forming model for a virtual power plant based on stochastic programming[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020,118(1):105784.

# 适用于电力场景的人工智能中台技术与探索

张凌浩<sup>1</sup>, 潘文分<sup>2</sup>, 庞博<sup>1</sup>, 吴凯军<sup>2</sup>, 张颀<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司凉山供电公司, 四川 凉山 615000)

**摘要:**目前电力人工智能技术在电力各业务领域都有一定的应用成果,但大多在业务应用层面,缺少对人工智能技术系统级的解决方案。文中对人工智能在电力行业应用落地存在的问题进行探讨,给出了解决办法。针对样本收集面临数据分散、收集困难的情况,一方面建设统一平台进行样本收集,使得各地样本收集快速、简便;另一方面引入数据回流思想,将推理侧检测的数据传回样本收集平台,实现样本筛选、收集流程自动化。对于数据标注工作量大的问题,提出了主动交互式标注技术,实现样本数据智能标注。对于模型训练样本量少的问题,引入迁移学习的思想,采用预训练模型,在不影响模型效果的同时,还减少模型训练时间。对于模型迁移至边缘设备,因边缘设备架构、模型框架造成模型移植性差的问题,基于开放神经网络交换(ONNX)实现不同目标架构的模型转换,解决硬件兼容的问题,提升模型的复用性。

**关键词:**人工智能技术;智能标注;云边协同;迁移学习;技术中台

**中图分类号:**TM 769 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)03-0016-07

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220303

## Research and Exploration of Artificial Intelligence Middle Platform Technology Suitable for Power Scene

ZHANG Linghao<sup>1</sup>, PAN Wenfen<sup>2</sup>, PANG Bo<sup>1</sup>, WU Kaijun<sup>2</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Liangshan Electric Power Supply Company, Xicang 615000, Sichuan, China)

**Abstract:** Recently, artificial intelligence technology in power system has some application achievements in various electric business fields, but most of them are at the application level, lacking system level solutions. The problems existing in the application of artificial intelligence in power industry are discussed, and the solutions are given. Aiming at the situation that the sample collection is faced with data dispersion and collection difficulties, on the one hand, a unified platform is built for sample collection to make it fast and simple, on the other hand, the idea of data backflow is introduced to collect the data detected on the reasoning side to the sample collection platform, which realizes the automation of sample screening and collection process. Since data annotation is a labor-intensive work, an active interactive annotation technology is proposed to realize the intelligent annotation of sample data. For the problem of small sample size of model training, the idea of transfer learning is introduced, and the pre-training model is adopted, which not only does not affect the effect of the model, but also reduces the training time of the model. For the model migration to edge devices, the poor portability of the model is caused by the edge device architecture and model framework. The model conversion of different target architectures is realized based on open neural network exchange(ONNX) to solve the problem of hardware compatibility and improve the reusability of the model.

**Key words:** artificial intelligence technology; intelligent annotation; cloud side collaboration; transfer learning; technical middle platform

## 0 引言

随着人工智能技术的飞速发展,越来越多的行业引进人工智能技术以解决行业中繁杂、耗时、强度大的工作,电力行业也不例外<sup>[1]</sup>。在电力系统中,输电、变电环节发挥着重要作用。变电站巡检、输电线路巡检有很多繁杂、重复的工作,线路、设备运行维护检修工作量大。一个基层线路班组每日的巡检工作会产生上千张巡检图片,而在上线了通道可视化系统之后,国网四川省电力公司平均每小时就会采集到5万余张现场照片。这些照片如果通过人工判别将会消耗大量时间精力。因此,国网四川省电力公司近年来利用人工智能算法对采集数据图像进行设备缺陷异常智能检测,逐步实现输变电的智能巡检运行维护。

人工智能在电力行业的应用包括计算机视觉、语音处理、光学字符识别(optical character recognition, OCR)、自然语言处理及知识图谱等方向。其中计算机视觉应用主要用以实现图像识别、目标检测和实例分割等目标。以目标检测算法YOLOv3<sup>[2]</sup>为例,其核心思想是将图像划分成多个网格,若某个待检测物体的中心落在图像中所划分的一个网格内,该网格负责预测该目标位置和类别,每个网格要预测多个边界框并给出相应概率;最后,根据概率判断哪个边框是物体所在完整边框。

基于深度学习技术,越来越多的智能模型应用到电力行业实现基层减负、工作效率提升。文献[3]采用主动学习和半监督自训练交替迭代训练的方式,有效提升了图像标注效率。文献[4]基于迁移学习的思想,利用模型微调法对预训练模型VGG\_CNN\_M\_1024和Faster R-CNN进行训练,实现推土机和挖掘机造成的输电线路外力破坏检测。文献[5]提出基于迁移学习的预训练方法,训练YOLOv3模型,实现在少量数据下,对防震锤与线夹检测识别,降低模型训练成本,提高模型准确性。文献[6]提出云-端协同的变电站机器人智能巡检新模式,以人工智能为核心技术,实现变电站巡检机器人实时巡检分析。文献[7]基于深度神经网络,实现变电站仪表类型识别及表计自动读数。文献[8]基于图像识别技术和移动边缘计算技术,将视频图

像分析能力分散在边端,快速定位输电线路设备故障,提高运检效率。

近年来,人工智能中台技术被广泛提出,提供云化人工智能平台级解决方案。文献[9]提出了一种适用于调控领域的人工智能平台,主要用于支撑知识图谱和调度分析计算方面的人工智能应用。文献[10]主要解决传统人工智能平台人机交互之间的问题。文献[11]重点提出了一种资源调度方法。

上述技术在电力特定场景中的应用具有一定成效,但仍存在以下问题:

- 1) 模型开发通常和业务系统具有紧耦合关系,部署效率低,资源浪费较大,且很难实现共建共享;
- 2) 人工智能算法普遍需要大量样本进行模型训练,且需要大量人工进行标注,各单位样本少且分散,样本收集不方便,数据标注困难;
- 3) 由于模型训练框架与推理框架不同,不同架构下,模型不能直接使用,需要在新框架下再开发,导致模型迁移不方便,造成成本浪费;
- 4) 在实时性要求较高场景下,需要模型部署到边端设备,由于边端设备分布广,与云端架构差异大,将模型迁移到边端设备上运行时,需针对每台设备架构进行单独适配,模型部署困难,导致模型迁移成本高。

为解决上述问题,下面提出一套适用于电力场景的人工智能中台技术架构,以容器和容器编排引擎kubernetes(K8s)为底层架构实现资源灵活调度,同时包括数据回流、图像智能标注、模型预训练、模型转换等关键技术,提升了电力人工智能技术的易用性。首先,通过数据回流实现在调用模型服务预测时同步收集样本,同时通过主动学习方法,实现样本自动标注;然后,考虑到电力场景的相似性,引入迁移学习技术,对预训练模型进行网络参数二次优化实现知识迁移;最后,通过模型转换,实现云端架构模型自动转换,部署至边端设备。通过人工智能中台技术,可以降低人工智能模型开发和适配难度,其易用性显著提升。

## 1 电力人工智能中台技术架构

人工智能应用全流程包括样本收集、样本标注、

模型生产和推理应用,针对引言中提到的几个问题,给出相应解决办法,总体设计框图如图 1 所示。

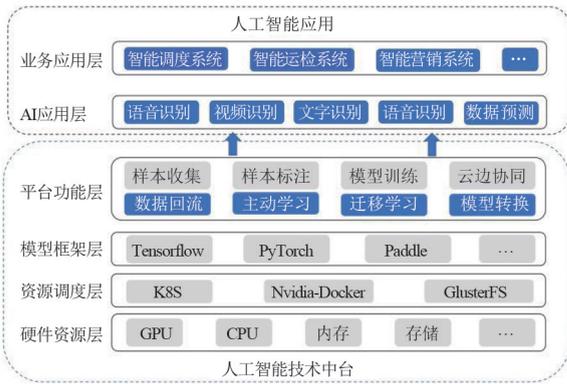


图 1 电力人工智能中台技术架构

在该架构下,模型的开发、训练、推理环境全部采用应用容器引擎(Docker)的方式独立运行,其中需要图形处理器(graphics processing unit, GPU)的环境采用 Nvidia-Docker 方式,使得容器内部可以直接访问到底层物理 GPU 资源。通过虚拟化技术,可以将 GPU 分成逻辑上的多个分片,进一步提升了资源利用率。存储资源统一采用 GlusterFS 架构管理,GlusterFS 是一种分布式文件系统,具有强大的横向扩展能力,通常采用 3 副本的方式,提供数据可靠性保障。而中台整个容器调度采用 K8s 架构,可以实现负载均衡、弹性扩容等灵活调度和扩展功能,使得整个人工智能中台更加高效可靠。

样本收集方面,通常都是在线下从不同渠道进行收集,再上传至人工智能中台,现引入数据回流的思想,实现样本自动收集。电力人工智能应用通常以容器服务的形式部署在中台,客户端(业务系统端)与云端服务之间的通信通过应用程序接口(application programming interface, API)调用实现。以图像目标检测为例,客户端通过服务接口传输待识别的图片和相关请求参数,云端模型识别后输出目标位置、类别、置信度等信息。考虑到样本自动收集,采用样本回流的方式,模型输出常规信息的同时输出图片至样本库中,并根据模型返回的类别和可信度值进行分类保存,实现数据筛选、收集自动化。

数据标注方面,基于已标注信息,可以通过人工智能(artificial intelligence, AI)模型对数据进行智能标注,标注人员在此基础上进行审核纠正。采用目标检测模型对图像进行物体检测,并将结果输出为

标注文件,实现样本自动标注;同时,引入主动学习方法,优先挑选出标注较难或比较有代表性的图像进行标注展示,若不符合预期,则将无法识别的图片进行人工修正,继续训练标注模型,直到标注达到预期,再将模型用于全局化标注。

模型训练方面,针对某些实际场景样本数据较少、模型训练效果不好的情况,引入迁移学习的思想,将其他相近任务的已有模型作为预训练模型,使用预训练模型权重参数并使用微调法进行训练,在目标数据量少的前提下也能得到很好的效果。

模型推理方面,对于硬件架构、模型框架不同导致模型无法运行的情况,基于开放神经网络交换(open neural network exchange, ONNX)格式将模型转换为适配边端设备的模型再进行下发,提高模型部署智能化水平,减少模型部署时间,提升模型的适配性。

## 2 基于主动学习的样本标注

### 2.1 主动学习

样本质量往往影响训练模型的效果,选取一部分最有价值的样本数据进行标注、训练,得到同样效果甚至更好的模型是热点方法。其核心任务是筛选出最具有代表性的样本,主动学习正好可以实现这一任务。主动学习<sup>[12]</sup>是机器学习的一个分支,其思想是从未标注样本中选择对模型有价值的样本从而提高模型效果。基于数据池的主动学习可以通过使用尽可能少的标注样本,训练出较好的分类器模型,实现大量未标注样本的自动标注。

基于数据池的主动学习循环如图 2 所示,其过程大致是:标注少量数据进行模型训练;再从大量未标注样本池中筛选出关键图片数据,提交标注请求,由标注人员进行人工标注;再将新标注的样本加入训练集,重新训练模型;依次迭代循环。

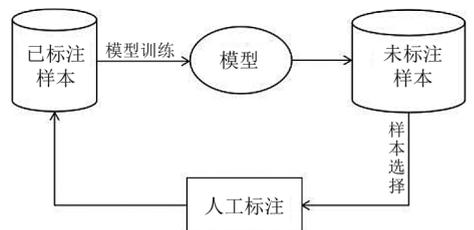


图 2 基于池的主动学习循环

主动学习是通过查询函数选择出最有用的样本,查询函数常用策略是不确定性准则和差异性准则<sup>[13]</sup>。不确定性策略就是找出不确定性高的样本。不确定性越高的样本,包含的信息量越丰富,对模型训练越有用。差异性指的是选择样本之间应有差异,避免选择样本信息重复,有效避免数据冗余。部分主动学习查询函数是基于信息熵进行设计。

### 2.2 智能标注

数据标注是对原始数据打标签,输送到人工智能模型进行训练学习。而模型训练数据越多,模型准确率越高,由此,大量训练数据使数据标注的工作量变大。数据标注通常是专业标注人员借助标注工具进行手工标注,重复地拉框、标点,标注强度大,整体标注效率底下。随着人工智能技术的发展,数据标注朝着自动标注方向发展,目前数据标注还不能实现完全自动化,但可以在机器标注+人工标注的前提下,尽量减少人工,将机器标注比例逐步提升。这里采用一种基于主动学习的智能标注方法,实现数据标注半自动化,提升标注速率和标注质量。

下面主要研究目标检测中的图像标注,结合主动学习的思想,实现图像智能标注,实现流程如图3所示。该方法中,工作人员不再需要从头开始标注,只需要判断标注是否正确并进行调整,极大地降低人力成本并使标注速度大幅提升。智能标注算法步骤如下:

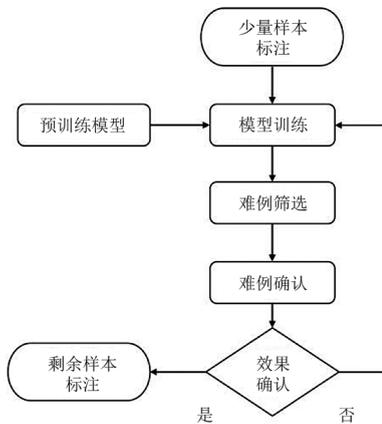


图3 基于主动学习的智能标注流程

1) 数据准备:从待标注样本中随机挑选不低于50张照片进行手动标注。

2) 模型训练:采用基于电力场景下预训练目标

检测模型YOLOv3作为预训练模型进行训练。

3) 难例筛选:基于主动学习,从未标注样本中筛选出最具价值性的难例样本进行标注,将标注结果输出成标注文件。

4) 难例确认:人工审核模型标注照片,若不满足标注要求,人工修正标注,将新标注数据加入到训练数据,重复循环步骤2至步骤4,直到满足要求;若满足标注要求,即启动模型标注剩余所有照片。

## 3 基于预训练模型的迁移学习技术

### 3.1 迁移学习

迁移学习是将一任务中获得的知识应用到另一目标任务中<sup>[14]</sup>,其定义如下:

域(Domain): $D = \{X, P(X)\}$ ,式中 $X$ 为特征空间, $P(X)$ 为边缘概率分布。

任务(Task): $T = \{y, f(\cdot)\}$ ,式中 $y$ 为标签空间, $f(\cdot)$ 为目标函数。

迁移学习(transfer learning):给定一个源域 $D_s$ 和学习任务 $T_s$ ,一个目标域 $D_T$ 和学习任务 $T_T$ ,迁移学习利用 $D_s$ 和 $T_s$ 中的知识来帮助学习在目标域 $D_T$ 的目标函数 $f_T(\cdot)$ ,其中 $D_s$ 不等于 $D_T$ , $T_s$ 不等于 $T_T$ 。

传统的机器学习通常是从零开始学习每一个任务,从迁移学习流程(见图4)可以看出,迁移学习是在以前任务的基础上,将以前的一些任务中的知识转移到目标任务中。

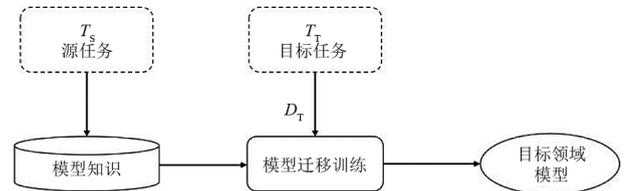


图4 迁移学习流程

以图像识别中卷积神经网络为例,深度神经网络前几层是提取线条、轮廓等通用特征,对该网络的前几层进行迁移,可以减少深度神经网络的训练时间。迁移学习在深度学习中通常有2类用法:1)冻结与训练,将相近任务模型的大部分参数直接应用到新任务训练中,重新训练部分网络层。以神经网络为例,冻结提取特征的卷积层网络,仅对全连接层进行训练。2)微调,将原始训练模型的权重参数作为

初始值,在目标数据集中训练所有层,通过固定  $N-1$  层的参数,对剩下一层进行训练,实现参数微调<sup>[15-16]</sup>。

### 3.2 预置模型训练

在机器学习中,训练数据量较少时,训练模型效果不好,且训练过程需要大量时间完成模型参数调整选出最优参数,训练时间长。当无法收集到大量高质量数据时,可以结合迁移学习的思想,采用微调法进行预置模型训练,进一步地可以通过域对抗网络(domain-adversarial neural network, DANN)<sup>[17]</sup>,提升迁移学习效果。如图 5 所示,基于 DANN 的迁移学习训练将网络模型分为特征提取、领域分类和标签分类 3 个部分,共同训练,优化迁移学习的效果。

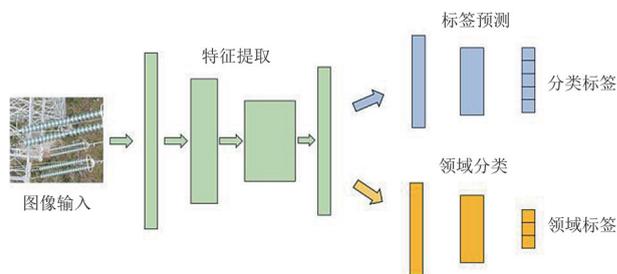


图 5 基于 DANN 的迁移学习训练

由于在电力应用中,部分场景具有一定的相似性,可将迁移学习技术应用于输电线路的输电通道可视化模型,应用于变电站隔离开关、仪表等设备状态识别的变电站仪表开关识别模型,以及应用于生产环境人员穿戴、行为的安全生产监控模型。基于输电、变电、安监三大典型电力场景,所开发的人工智能训练和推理平台已实现了三大场景 10 类预训练模型,采用了 SSD-MobileNetV1、YOLOv3-MobileNetV1、YOLOv3-DarkNet、Faster R-CNN-ResNet50vd-FPN 等网络模型,将不同单位收集到的缺陷样本进行二次调优训练,得到针对不同生产环境下的输变电设备缺陷异常检测和现场作业安全行为分析模型,基准模型识别率在 70%~90%之间。

## 4 基于智能转换的云边协同框架

### 4.1 模型转换

对于实时性要求较高的业务场景,通常优先选择边缘计算的方式,在边端侧安装智能终端设备,部署人工智能模型进行就地及时处理。尽管目前在云

端训练模型、部署服务、运行已经比较成熟,但云端的 X86 架构和边端以 ARM 为主的各类异构芯片架构的差异,使得模型迁移仍然需要考虑硬件兼容、能耗与性能等问题,仍有很多困难。

由于模型训练过程和推理服务侧重点不同,大部分主流训练框架和推理框架也有所不同,为此,实现模型在不同框架之间的转换,是避免模型重复开发、浪费资源较好的办法。目前主流模型转换技术是 ONNX 技术,是针对深度学习设计的一种开放式的文件规范,主流深度学习框架都支持这种规范标准。而 ONNX 是一种针对机器学习所设计的开放式的文件格式,用于存储训练好的模型,ONNX 使得不同的人工智能框架可以采用相同格式存储模型数据并交互,使模型在不同框架之间进行转换。

模型转换实现过程如下:

1) 计算图生成:在模型推理过程中,框架会记录执行算子的类型、输入输出、超参数、参数等算子信息;最后,把算子节点信息和模型信息结合得到符合 ONNX 标准的静态计算图。

2) 计算图转换:解析静态计算图,根据计算图和目标格式的定义,转换出目标框架模型。

### 4.2 云边协同

结合云边协同的理念,在边缘侧部署 AI 模型,实现人工智能在电力场景中的边缘智能应用。边缘计算需要在边缘端部署边缘物理代理及模型。由于边端设备各式各样,这里采用容器化、模块化的方式,部署边缘本地运行包,赋能边缘计算节点,让本地设备具备本地计算、AI 推断等能力。同时,采用 ONNX 技术,生成适配边端设备的计算模型,已支持 X86、ARM 等多种硬件以及 Linux、MacOS 和 Windows 等各类操作系统。智能边缘实现流程如图 6 所示,图 6(a)是云端模型与边端设备架构相同时的流程;图 6(b)是与云端模型不适配的边端设备,需要先进行模型转换的流程。

传统云边协同下发模型推理到边缘设备,以容器形式下发,占用带宽,且不同处理器架构下容器不能通用。对此,使用 ONNX 进行模型转换,将模型转换为适配边端设备的模型,再将模型文件下发至边端设备,在边端采用 Docker+K3s 的方式部署模型,提升模型资源管控能力。

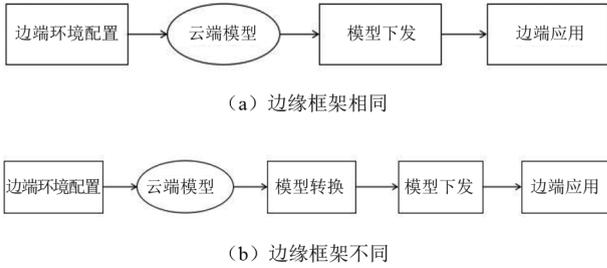


图 6 智能边缘实现流程

## 5 应用成效

基于以上提出的技术,开发了统一开放的四川电力人工智能中台,中台架构如图 7 所示,包括两库(“样本库”和“模型库”)、一平台(人工智能训练和推理平台)。中台在硬件上由 13 台服务器组成,配置 56 张 Nvidia T4 GPU 加速卡,采用 Docker+K8s 的方式实现资源调度,内置深度学习和机器学习预训练模型,为模型生产提供便利。中台上人工智能模型以容器方式提供在线服务,通过规范化的服务接口,可以方便各业务系统直接进行集成调用,且通过数据回流技术实现了在进行预测服务的同时,在线收集到各类样本。中台搭建了服务门户页面,对目前已上线 AI 算法模型的调用接口、功能描述进行展示和试用。

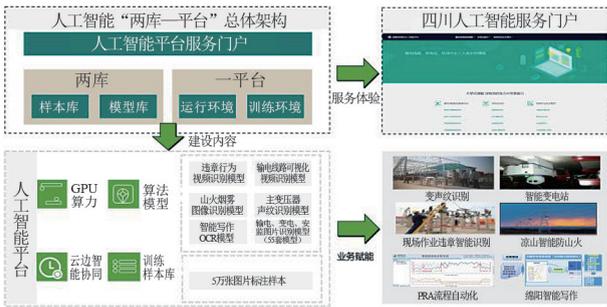


图 7 人工智能中台应用架构

目前,人工智能中台已收集典型电力缺陷样本 6.5 万张;基于智能标注算法,完成 4 万张样本标注;采用预训练模型,开发部署输、变电场景中设备异常缺陷识别、现场作业安全行为分析、文字识别算法模型共 119 个,并投入生产一线使用。截至 2021 年年底算法模型累积服务次数超过 100 万次,主要应用成效如下:

1) 助力现场安全作业管控。开发现场作业 60 余种违章算法模型,在 140 个基层班组进行试运行,

识别正确率达到 90%,截至 2021 年年底,累计辅助完成管控各类作业场所共计 3806 场,涉及作业人员 17 593 人次,分析视频共计 214 000 h,成功发现违章 2797 次,作业现场违章率下降 91.58%。

2) 实现森林火灾监测预警。输电线路森林防火面临点多线长面广特点,一线班组人员巡视压力巨大,国网四川省电力公司在 220 kV 周格一线、永理二线、山越二线等 13 条森林火灾易发线路部署 887 个摄像头,开发山火、烟雾检测模型,对采集图像进行山火智能识别,算法模型已提供算法服务 413 965 次,成功预警山火 137 次,有效提升森林草原防山火工作效率。

3) 实现了对智能运检管控平台(无人机管控平台)的全面智能服务。国网四川省电力公司绝大部分输电线路处于山区、无人区,一线班组人员巡线压力巨大。依据预训练模型开发部署鸟巢、异物、绝缘子、均压环异常检测等 75 个算法模型,采用云边协同方式和模型转换技术,将模型下发至边缘物联代理,提高图像识别实时性,累计收集输电线路缺陷样本 11 838 张,算法模型累计服务超过 12 275 次,巡检效率提升超过 2 倍。

4) 提升变电站巡检质效。国网四川省电力公司在 110 kV 峨山变电站开展变电站智能巡检试点,开发部署表计读数、油温油位、压板投退、绝缘子、呼吸器等 90 类图像识别算法模型,对变电站内各类设备的状态进行实时监控,及时预警,缺陷诊断预警准确率达到 90%,减少人工巡视的 80% 工作量。

5) 提升智能审计效率。国网四川省电力公司利用电力人工智能平台开发部署的 OCR 模型,将传统人工费结算纸质材料快速转换为结构化数据条目,对人员的出勤记录和结算数据进行智能识别与比对。截至目前,已实现对 208 个劳务分包项目、2 248.79 万元民工费的稽核,共挽回经济损失 20 余万元,审计覆盖面由之前的 20% 提升至 50%,抽样比例由之前的 30% 提升至 90%,现场审计时间压缩近 50%。

## 6 结 论

上面主要针对人工智能在电力企业所面临的样

本收集、标注困难、训练样本少、模型边缘部署困难等问题,建设了集样本收集和标注、模型训练、模型转换、云边协同等为一体的统一开放平台,清扫电力行业中人工智能应用的阻碍,助力人工智能在电力行业广泛化、自动化应用。

### 参考文献

- [1] 华志刚,李璟涛,汪勇,等.发电行业人工智能应用[M].北京:中国电力出版社,2020.
- [2] Joseph REDMON, Santosh DIVVALA, Ross GIRSHICK, et al. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection[C].2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CUPR),2016: 779-788.
- [3] 吕佳,傅屈寒.基于改进主动学习和自训练的联合算法[J].北京师范大学学报(自然科学版),2022,58(1): 25-32.
- [4] 吕宁.基于深度学习的输电线路防外力破坏监测系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- [5] 张永翔,吴功平,刘中云,等.基于YOLOv3网络的输电线路防震锤和线夹检测迁移学习[J].计算机应用,2020,40(S2):188-194.
- [6] 杨英仪,郑友亮,沈映娜,等.云-端协同的变电站机器人智能巡检新模式[J].广东科技,2020,29(8):32-36.
- [7] 陈旭.基于深度学习的变电设备图像特征提取[D].南京:南京邮电大学,2018.
- [8] 王艳如,刘海峰,李琳,等.基于边缘智能分析的图像识别技术在输电线路在线监测中的应用[J].电力信息与通信技术,2019,17(7):35-40.
- [9] 陶洪铸,翟明玉,许洪强,等.适应调控领域应用场景的

人工智能平台体系架构及关键技术[J].电网技术,2020,44(2):412-419.

- [10] 黄安子.电力人工智能开放平台关键技术研究及应用[J].自动化与仪器仪表,2020(5):189-192.
- [11] 黄巨涛,郑杰生,高尚,等.基于云平台的的人工智能开源开发平台框架研究[J].自动化与仪器仪表,2020(7):159-162.
- [12] Burr SETTLES. Active Learning Literature Survey[R]. Computer Sciences Technical Report 1648, University of Wisconsin-Madison, 2010.
- [13] 蔡莉,王淑婷,刘俊晖,等.数据标注研究综述[J].软件学报,2020,31(2):302320.
- [14] Sinno Jialin PAN, Qiang YANG. A Survey on Transfer Learning[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2010,22(10):1345-1359.
- [15] Lisboa P, John L. Handbook of Research on Machine Learning Applications and Trends[M]. [s.l.]:Information Science Reference, 2009.
- [16] Sari SULTAN, Imtiaz AHMAD, Tassos DIMITRIOU. Container Security: Issues, Challenges, and the Road Ahead[J]. IEEE Access, 2019, 7: 52976-52996.
- [17] Yaroslav GANIN, Evgeniya USTINOVA, Hana AJAKAN, et al. Domain-Adversarial Training of Neural Networks[J]. Journal of Machine Learning Research, 2016, 17:1-35.

### 作者简介:

张凌浩(1985),男,博士,高级工程师,研究方向为电力人工智能和大数据应用技术;

潘文分(1994),女,硕士,助理工程师,研究方向为电力图像识别;

庞博(1994),男,硕士,助理工程师,研究方向为电力人工智能技术。(收稿日期:2022-04-07)

(上接第15页)

- [20] Morteza SHABANZADEH, Mohammed-kazem Sheikh-EI-Eslami, Mahmoud-Reza HAGHIFAM. A medium-term coalition-forming model of heterogeneous DERs for a commercial virtual power plant[J]. Applied Energy, 2016,169:663-681.
- [21] Liwei JU, Qinliang TAN, Yan LU, et al. A CVaR-robust-based multi-objective optimization model and three-stage solution algorithm for a virtual power plant considering uncertainties and carbon emission allowances[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019,107(3):628-643.
- [22] 辛禾.考虑多能互补的清洁能源协同优化调度及效

益均衡研究[D].北京:华北电力大学,2019.

- [23] 邓创,鞠立伟,刘俊勇,等.基于模糊CVaR理论的水火电系统随机调度多目标优化模型[J].电网技术,2016,40(5):1447-1454.

### 作者简介:

刘国新(1996),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制;

吴杰康(1965),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制;

蔡志宏(1996),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制。(收稿日期:2022-03-22)

# 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术

王 鸿<sup>1</sup>, 邓元实<sup>2</sup>, 常政威<sup>2</sup>, 吴 杰<sup>2</sup>, 陈明举<sup>1</sup>

(1. 四川轻化工大学人工智能四川省重点实验室, 四川 宜宾 644000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**目前的电力现场安全监控主要通过人员对监控视频进行全程监测,但采用人工检测的方法不仅浪费时间,而且容易出现漏报的情况,使工作人员的人身安全无法得到保障。为实现对作业现场人员行为的智能识别,提出了一种基于 OpenPose 的电力作业人员的危险行为识别技术。该方法提取视频流图像中电力作业人员骨骼关键点信息,利用深度神经网络实现多人场景下电力作业人员的人体行为姿态感知,实时对施工人员的违规行为进行检测识别,并发出警告。所提方法实现了对电力现场作业人员行为的准确、实时安全监控,保障了现场作业人员的人身安全和电力作业的顺利进行,具有一定的鲁棒性与泛化能力。

**关键词:**姿态估计;深度学习;电力作业;行为识别

**中图分类号:**TP 302.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)03-0023-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220304

## Behavior Recognition Technology of Power Operating Person Based on Deep Learning

WANG Hong<sup>1</sup>, DENG Yuanshi<sup>2</sup>, CHANG Zhengwei<sup>2</sup>, WU Jie<sup>2</sup>, CHEN Mingju<sup>1</sup>

(1. Artificial Intelligence Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan University of Science &

Engineering, Yibin 644000, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power

Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** At present, the field safety monitoring relies on the professionals to monitor the surveillance video throughout the process, and the manual detection method is very time-consuming and prone to false alarms, which is difficult to ensure the personal security during the operation. In order to realize the intelligent recognition of human behaviors in power operation field, an OpenPose-based method for detecting dangerous behaviors of electric power workers is proposed. This method extracts the key point information of electric workers' skeletons from the video stream images, and uses deep neural network to realize human behavior situation awareness in multi-person scenarios, which can realize the real-time detection of construction personnels' illegal behavior and issue early warning. The proposed method realizes the accurate and real-time safety monitoring of human behaviors in power operation field, and guarantees the personal security in the field and the smooth progress of power operation, and the model has a good robustness and generalization ability.

**Key words:** human pose estimation; deep learning; power operation; behavior recognition

## 0 引言

电力事故不仅会造成人身伤害,还会影响电力系统的稳定运行<sup>[1]</sup>。为了保障电力作业人员的生

命安全,电力行业制定了全方位的安全工作规程,并在作业人员上岗前进行培训,规范其行为操作提高其安全素质<sup>[2-3]</sup>。经调查研究发现,作业人员的安全意识淡薄违章操作以及电力现场监管人员的管理责任缺失对作业现场监管不严,是电力事故发生的主要原因。因此,如何高效地加强作业现场的安全管控力度,提高电力作业人员的安全和工作质量,促

**基金项目:**四川省科技厅项目(2020JDJQ0075);国网四川省电力公司科技项目(521997190016);四川轻工大学研究生创新基金项目(Y2021073)

进电力作业人员提升安全意识避免违章成为亟需解决的问题<sup>[4-5]</sup>。

近年来计算机视觉技术得到快速发展,诸如人体姿态估计和行为识别这样的任务受到了学者们的广泛关注<sup>[6]</sup>。文献[7]建立了基于单个图像或视频捕捉快照的人体动作识别系统,对比神经网络、随机森林、k 近邻和支持向量机 4 种分类器对人体动作识别分类。文献[8]提出了人类行为特征识别,根据视频片段对视频中人物的全局特征提取和局部特征提取两种算法的应用和优缺点进行分析。文献[9]将学生的动作指定为 6 种典型行为,提出了改进 OpenPose 的行为识别方法,并且基于决策树的支持向量机对堂上学习者的行为进行分类。文献[10]检测人体姿态关键点并对变电站的安全区域标定识别,判断电力作业人员的双脚是否在标定的安全区域内,确定作业人员是否处于安全状态。以上的研究对人体姿态和行为识别技术取得了一定的研究成果,但将 OpenPose 姿态估计算法引入到电力作业现场,实现精确高效的行为识别的研究还有一定的不足之处。

行为识别技术<sup>[11]</sup>从本质上来讲就是一种分类问题,而人体动作识别的算法都是基于传统算法或者基于深度学习开展的。基于传统算法的研究主要是依靠人为提取特征,这种传统的算法因通过人为解决而效率低下,且提取特征不准确,也不能完全实时对电力作业人员的行为进行分类检测。针对这些问题,提出了一种基于 OpenPose 的人体姿态识别技术,通过神经网络对提取的电力作业人员的骨骼图进行行为识别,提高了检测的速度和准确率,避免由于电力现场的复杂环境而导致的检测错误,及时对危险行为检测并进行预警处理,避免出现严重的安全事故,造成人力物力以及财力的损失<sup>[12]</sup>。

## 1 作业人员行为识别深度学习网络设计

### 1.1 行为识别整体网络设计

主要针对电力作业人员行为态势设计行为识别流程如图 1 所示。首先,输入电力作业人员相关视频流,将其处理为视频帧图像,对数据做相关的预处理;然后,将现场作业人员的视频帧图像输入到人体 2D 姿态估计的 OpenPose 模型中,采用计算机视觉组(visual geometry group, VGG)提取电力作业人员

的关键点位置信息及关键点连接的骨骼图;接着,将提取得到的骨骼图信息通过一系列处理后保存为最终的训练集;最后,将训练集通过深度神经网络(deep neural networks, DNN)进行电力作业现场作业人员的行为识别。

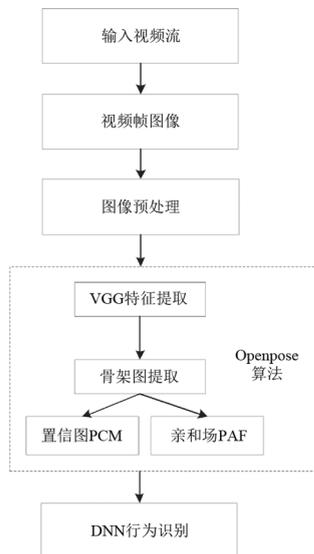


图 1 电力作业人员行为识别整体技术流程

### 1.2 基于 OpenPose 关键点检测网络

近年来,基于深度学习原理进行的人体姿态估计方法被提出且得到广泛应用。而 OpenPose 人体姿态估计是自底向上关键点检测方法<sup>[13]</sup>,使用部分亲和字段(part affinity fields, PAF)算法,完成从人体关键点检测到关键点与关键点之间的连接过程。OpenPose 的输入是一幅人体姿态的图像,输出是该算法检测到的所有人的体的骨骼。人体骨骼图共提取 18 个关键点,包括眼睛、鼻子、手臂和腿等,如图 2 所示。图 3 为识别的作业人员的骨骼关键点图。

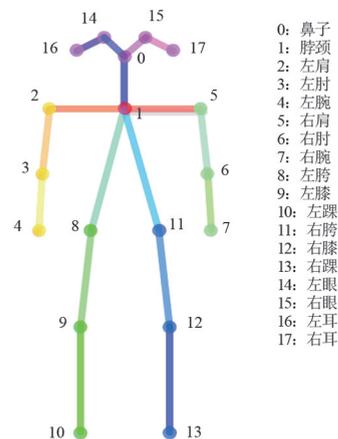


图 2 18 个关键点

所采用的美国卡内基梅隆大学实验室的 OpenPose 姿态估计算法,是基于卷积神经网络并采



图 3 人体骨骼关键点图

用 caffe 框架开发的开源库,可以实现人体的姿态动作、面部表情识别以及手指相关运动等,对多人的二维识别有极好的鲁棒性,且具有识别效果精准、速度高等特点。OpenPose 外部网络结构如图 4 所示。该模型总共分为两个阶段识别人体的关键点<sup>[14]</sup>,如图 5 所示。

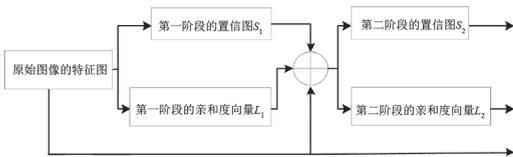


图 4 OpenPose 外部网络结构

第一阶段:VGG 的前 10 层用于为输入图像创建特征映射  $F$  (feature map)。

第二阶段:将第一阶段输出得到的特征图作输入,包括两个分支多阶段卷积神经网络迭代训练。其中,第一个分支输出结果为  $S$  的集合  $S=(S_1, S_2, \dots, S_j)$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, j\}$ ,  $j$  表示第  $j$  个关键点。这

一分支用来预测人体关键点位置信息的一组 2D 置信图 (part confidence map, PCM);另一个分支输出结果为  $L$  的集合,  $L=(L_1, L_2, \dots, L_c)$ ,  $c \in \{1, 2, \dots, c\}$ ,  $c$  表示第  $c$  个躯干,用来预测部分亲和度的 2D 矢量场,表示关键点与关键点之间的局部区域亲和力 PAF,如式(1)所示。

$$\begin{cases} S_1 = \rho_1(F) \\ L_1 = \phi_1(F) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} S_t = \rho_t(F, S_{t-1}, L_{t-1}), \forall t \geq 2 \\ L_t = \phi_t(F, S_{t-1}, L_{t-1}), \forall t \geq 2 \end{cases}$$

式中:  $\rho_1$  和  $\rho_t$  分别为第一阶段和第  $t$  阶段 PCM 的预测网络;  $\phi_1$  和  $\phi_t$  分别为第一阶段和第  $t$  阶段 PAF 的预测网络。

每个阶段 (Stage) 都是一些串行的模块,前面的 Stage 先检测出一些简单的关键点,后面的 Stage 再根据前面检测出来的信息继续检测更复杂情况下的关键点。通过多阶段的卷积神经网络的反复预测,实现渐进优化的过程,使得到的预测结果更加准确<sup>[15]</sup>。最后得到置信图和亲和力,通过关键点对  $d_{j1}$  和  $d_{j2}$  之间的 PAF 来判断关键点之前的连接是否正确<sup>[16]</sup>,如式(2)所示。

$$E = \int_0^1 L_c(p(u)) \times \frac{d_{j1} - d_{j2}}{|d_{j2} - d_{j1}|_2} du \quad (2)$$

式中:  $d_{j1}$  和  $d_{j2}$  分别为某人的两个连续的像素点  $j_1$  和  $j_2$ ;  $p(u)$  为连续像素点之间连线的取值,如式(3)所示,  $u$  的取值为  $(0, 1)$ 。

$$p(u) = (1 - u)d_{j1} + d_{j2} \quad (3)$$

### 1.3 DNN 行为识别

DNN<sup>[17-18]</sup> 是一个具有多层结构的数学模型,根

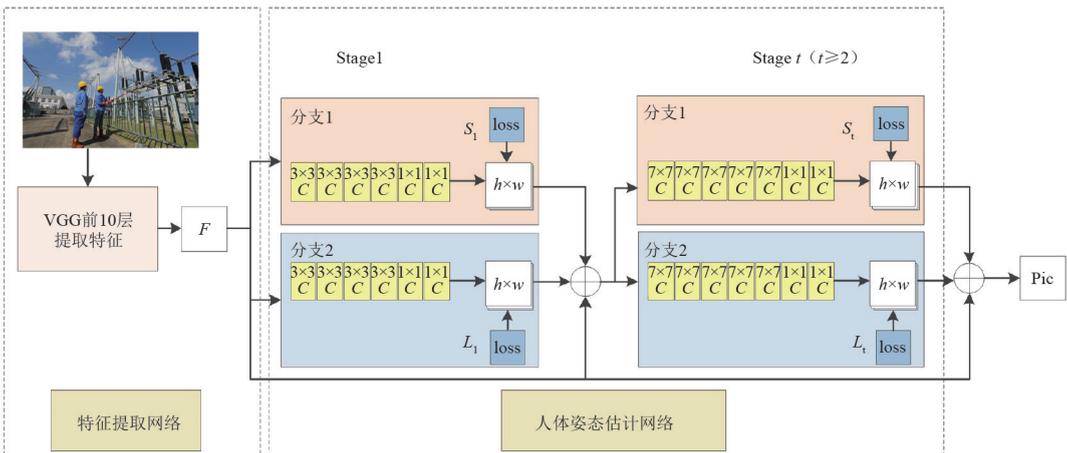


图 5 OpenPose 模型结构

据每层结构的位置可以分为 3 层:输入层、隐藏层和输出层。其网络的结构示意如图 6 所示。

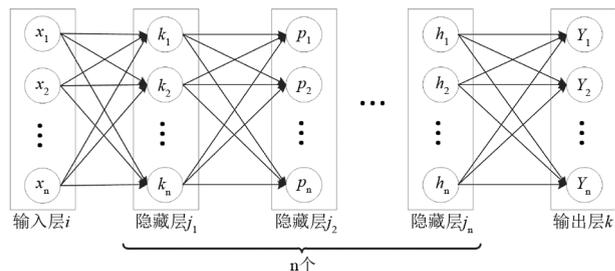


图 6 深度神经网络结构

假设输入  $n$  维的信号,特征向量表示为  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ ,那么,每个隐藏层的神经元与前一层之间的神经元权值的关系可以表示为

$$y = f(w^T x + b) \quad (4)$$

式中: $y$  为输出; $f$  为非线性激活函数; $w$  为权值系数; $b$  为偏置。也就是每个神经元的输出值是输入信号的线性组合,加上偏置后经过一个非线性的激活函数  $f$  的输出值结果,而每个神经元经过  $n$  层隐藏层处理后,通过最后一层输出层得到的结果就是最终 DNN 的输出结果。

因此,为了使深度神经网络能更好地提取数据集中有用的电力作业人员骨骼信息,得到预期的输出效果,深度神经网络需要不断调节参数权重  $w$  和偏置  $b$ ,从而达到最佳训练的学习目的,使网络最终的输出值与实际值的损失达到最小。所采用的训练模型损失函数为均方误差函数(mean square error, MSE),表达式为

$$f_{\text{MSE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

式中: $n$  为样本数; $y_i$  为样本真实值; $\hat{y}_i$  为 DNN 的输出。

$w$  和  $b$  的优化更新过程可以表示为

$$\begin{cases} w' = w - \eta \frac{\partial L}{\partial w} \\ b' = b - \eta \frac{\partial L}{\partial b} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $w'$  和  $b'$  分别为进入网络后更新的权重值和偏差; $\eta$  为网络的学习率。通过学习率来控制网络的学习进度,并且能够决定网络是否能够成功找到全局最小值以及确定最小值的时间;通过调节学习率得到全局的最优参数解。通常来讲,如果学习率过大,则会造成整个网络无法收敛,忽视找到最优值的位置;而学习率设置得太小,则会导致整个网络收敛过程非常缓慢,从而增加找到最优值的时间,且也可能造成局部收敛而找不到真正的最优解。

## 2 实验与结果

实验在 Windows 系统下进行操作,采用深度学习的开源框架 TensorFlow。通过调用 Python 环境下的各种学习包,对实验进行训练和测试,用到的软件为 Pycharm2019,采用 python3.7 的框架。硬件环境为:处理器 Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90 GHz;运行内存 16.0 GB。

### 2.1 数据预处理

所使用的训练数据集为人工采集拍摄一组视频,每隔 25 帧截取一张,将视频流切割为 1888 张视频帧图像。对视频帧图像采用图线增广扩充等处理方式,加大训练样本个数,使训练数据集产生与原始视频帧图像类似的数据。这样能够达到扩充训练数据集的效果。通过对图像做增广处理,可以减小模型对某些特定属性的依赖作用,从而使模型的泛化能力得到提高。这里采用对图像进行左右翻转、平移等方法来实现数据集的扩充。如图 7 所示为图像进行扩充后的示意图。



(a) 原始图像

(b) 翻转的图像

图 7 训练图像的数据增广

数据集中共有 18 个关键点,包括鼻子、眼睛、左右手和左右脚等,且通过  $(x, y)$  的坐标来表示关键点的位置信息,将提取到的关键点信息保存为 train.txt 文本文件。通过脚本文件将读取到的关键点信息转换为 csv 格式,保存在 train.csv 文件中。并且,对每帧图像的行为进行标记,一共包括站立、走路、跳跃、摔倒和下蹲 5 个动作,用 0~4 依次对 5 个动作进行标注,将标注好的文件保存在 train\_act.csv 文件中。最后对关键点信息和行为信息的数据集进行训练。

将具有不同宽高比的图像缩放为相同单位,对采集到的错误的骨架关键点信息做删除处理。最后,得到 3775 张图片作为人体关键点行为识别的训练数据集。使用电力作业现场的图片作为测试数据集。

## 2.2 识别结果分析

总的数据集分为 2 组:训练的数据占 90%,验证的数据占 10%。通过基于深度神经网络的电力作业人员行为检测算法,给已经加上行为标签类别的骨骼信息数据做处理,对电力作业现场人员进行行为识别分析。采集的视频中包括电力作业人员摔倒等异常行为,同时也包含了正常情况下作业人员正常行走、下蹲等行为。通过人工方法对这些数据的类别进行行为标定。在 DNN 模型的训练过程中<sup>[19]</sup>,采用自适应学习率的 Adam 优化算法<sup>[20]</sup>,对梯度的一阶矩估计和二阶矩估计动态调整每个参数的学习率,通过多次实验和对参数的训练;最后,选取其中准确率和损失率最佳的一组参数:批处理量 batch\_size 为 32,训练次数(epoch)为 700 次。训练过程中的平均损失值如图 8 所示。

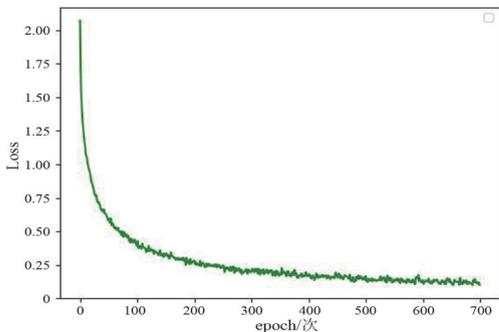


图 8 模型训练过程中的损失值下降曲线

由图 8 可知,模型训练过程中,随着训练的迭代次数增加,训练损失值逐渐减小<sup>[21]</sup>,且在 epoch 为 100~200 间趋于平滑状态,其中横坐标表示模型训练的迭代次数 epoch,纵坐标 Loss 表示其均方误差。通过多次试验得到 4 个较好的训练模型,如表 1 所示。

表 1 不同参数模型评估

epoch/次	训练损失值	训练准确率/%	测试损失值	测试准确率/%
400	0.160 5	94.42	0.365 4	87.10
600	0.116 9	96.28	0.529 5	87.63
700	0.106 1	96.58	0.357 6	92.47
800	0.110 9	96.16	0.393 8	89.80

从表 1 可以看出:随着 epoch 的增大,训练损失

值逐渐减小,且训练准确率逐渐变高,测试损失值和准确率也有同样的效果;当 epoch 等于 700 次时,此时的损失值达到最小,且准确率也达到最高,而之后的各项数值性能指标随着 epoch 的增大而变差。

使用该分类模型在测试数据集上进行测试,输入已知动作的视频,验证模型输出结果。如图 9 所示为检测出的电力作业现场人员站立和下蹲的姿态,图 9(a)为原始图像,图 9(b)为对应图像的骨骼关键点图以及检测出来的行为动作。从图 9 中可以看出,分类模型对作业人员的姿态都能进行准确的识别。并且从第三组电力作业人员的识别效果上可以看出,不但能识别出电力作业人员的行为动作为摔倒状态,同时会显示识别到的电力作业人员已摔倒,并发出警告。



(a) 原始图像

(b) 检测出为下蹲的图像

图 9 检测的电力作业人员行为姿态

## 3 结论

为了更好地保证电力作业现场工作人员的人身安全以及电力系统的稳定性,提出了基于 OpenPose 的电力作业人员危险行为检测技术。将电力作业人员的骨骼图通过 2D 人体姿态估计算法 OpenPose 提取出来,利用 VGG 网络的前 10 层提取电力作业人员的特征信息,避免电力现场的复杂环境影响提取目标的抽象特征。并利用庞大丰富的数据量,通过

对深度神经网络模型的训练,使得该模型的鲁棒性与泛化能力有所提升。通过实验证明所提技术能有效地识别工作人员的行为动作,并能对危险行为发出预警和报警,起到了对作业人员的安全监管。

### 参考文献

- [1] 黄金魁. 智能化移动设备应用在变电运检作业中的技术研究[J]. 新型工业化, 2019, 9(12): 40-44.
- [2] 施金鸿, 黄柳红. 高校电气实验室的安全问题及管理对策探析[J]. 科技风, 2019(34): 229.
- [3] 吴晓利, 周博, 徐志刚, 等. 电力行业现场实操培训安全管理的作用[J]. 大众标准化, 2020(13): 204-205.
- [4] 李越茂, 姚枫, 宋佩珂. 人工智能技术在电力行业的应用现状和发展趋势初探[J]. 电力勘测设计, 2022(2): 59-64.
- [5] 王斐, 林杰, 黎颖, 等. 基于大数据的电力行业现场作业风险评估方法研究[J]. 价值工程, 2018, 37(33): 1-4.
- [6] 郑重鹏. 电力现场作业人员跟踪定位系统设计与实现[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [7] Andi W R Emanuel, Paulus Mudjihartono, Joanna A M Nugraha. Snapshot-Based Human Action Recognition using OpenPose and Deep Learning[J]. IAENG International Journal of Computer Science, 2021, 48.0(4.0).
- [8] Yusong ZHANG, Yanbin LONG, Hongbo SUN, et al. Research on Video-based Portrait Behavior Analysis System[J]. International Core Journal of Engineering, 2021, 7(6): 581-585.
- [9] 苏超, 王国中. 基于改进 OpenPose 的学生行为识别研究[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(10): 3183-3188.
- [10] 朱建宝, 许志龙, 孙玉玮, 等. 基于 OpenPose 人体姿态识别的变电站危险行为检测[J]. 自动化与仪表, 2020, 35(2): 47-51.
- [11] 林里浪, 宋思捷, 刘家瑛. 基于人体骨架特征学习的动

作识别[J]. 中国传媒大学学报(自然科学版), 2021, 28(5): 22-28.

- [12] 蒋程西. 电力行业现场作业安全防护系统设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [13] Zhe CAO, Tomas SIMON, Shih-En WEI, et al. Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields[C]. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, 2017.
- [14] 王子沁. 基于 OpenPose 的人体行为识别系统研究与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
- [15] 张军鹏. 基于 OpenPose 的考场异常行为检测研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2021.
- [16] 张泽争, 王君, 董明利, 等. 基于改进 OpenPose 的类人机器人关键点快速检测方法[J/OL]. 激光杂志, 2022: 1-7[2022-04-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.TN.20220331.1128.006.html>.
- [17] 徐嘉杰, 卢兆军, 袁飞, 等. 基于深度神经网络和 SoftMax 分类器的台区负荷分类识别方法[J]. 电气自动化, 2021, 43(6): 102-104.
- [18] 王蓉, 熊杰, 刘倩, 等. 基于深度神经网络的重力异常反演[J]. 物探与化探, 2022, 46(2): 451-458.
- [19] 许志豪, 高铭, 殷绍轩, 等. 基于 OpenPose 的滑雪动作分析[J]. 智能计算机与应用, 2022, 12(4): 101-103.
- [20] 马文科, 张茜, 周晓杰. 基于卷积-循环神经网络的回转窑工况识别[J]. 控制工程, 2020, 27(8): 1310-1316.
- [21] 李光昌, 刘飞飞, 李嘉豪. 基于改进 OpenPose 算法的猪只行为识别方法[J/OL]. 河南农业大学学报, 2022: 1-17[2022-04-18]. <http://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20220117.001>.

### 作者简介:

王鸿(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为图像处理。

(收稿日期: 2022-04-24)

(上接第 7 页)

- [23] 徐小涵. 需求响应集成服务商参与电力市场的运行机制研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [24] 江苏能源监管办. 关于印发《江苏电力市场用户可调节负荷参与辅助服务市场交易规则(试行)》的通知[EB/OL]. (2020-11-10)[2022-01-04]. <http://jsb.nea.gov.cn/news/2020-11/20201110100742.htm>.

### 作者简介:

周涛(1976), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电网运行、市场交易管理;

钱寒晗(1981), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力市场及调度;

张纬(1986), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网调度、运检信息化和电力市场;

方天扬(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电并网电力系统稳定分析与控制;

李生虎(1974), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统可靠性和概率仿真、风电并网电力系统分析与控制、高压直流和柔性交流输电技术。

(收稿日期: 2022-03-17)

# 基于旋转 YOLOv5 的电力作业车态势感知方法研究

张劲松<sup>1</sup>, 邓元实<sup>2</sup>, 常政威<sup>2</sup>, 吴杰<sup>2</sup>, 陈明举<sup>1</sup>

(1. 四川轻化工大学人工智能四川省重点实验室, 四川 宜宾 644000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**针对电力作业场景下的电力作业车安全监测问题,提出了一种基于 YOLOv5 的旋转目标检测算法,通过检测电力作业车的机械臂旋转角度,判断电力作业车在当前作业场景下的作业姿态是否安全。文中以 YOLOv5 为主干网络,采用环形平滑标签的方法,将角度的边界回归问题转化为分类问题,解决了角度周期性变化带来的损失值突变问题。实验结果表明,CSP-DarkNet-YOLOv5l 模型对电力作业车机械臂的平均检测精度达到了 80.02%,均优于 GhostNet-YOLOv5l、MobileNetV3-YOLOv5l、ShuffleNetV2-YOLOv5l,并且对机械臂的旋转角度预测也最接近真实值。

**关键词:**旋转目标检测;角度预测;环形平滑标签;电力作业

**中图分类号:**TP 391.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)03-0029-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220305

## Research on Situation Awareness Method of Electric Work Vehicle Based on Rotated-YOLOv5

ZHANG Jinsong<sup>1</sup>, DENG Yuanshi<sup>2</sup>, CHANG Zhengwei<sup>2</sup>, WU Jie<sup>2</sup>, CHEN Mingju<sup>1</sup>

(1. Artificial Intelligence Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan University of Science &

Engineering, Zigong 644000, Sichuan Province, China; 2. State Grid Sichuan Electric

Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of safety monitoring of electric work vehicle in power operation scenes, a rotating target detection algorithm based on YOLOv5 is proposed. By detecting the rotation angle of mechanical arm of electric work vehicle, it can judge whether the working posture of electric work vehicle in the current operation scene is safe or not. The data annotation method of YOLOv5 is modified, and the circular smooth label method is adopted to transform the boundary regression problem of angle into a classification problem, so as to solve the sudden change of loss value caused by periodic change of angle. The experiment results show that the average detection accuracy of CSPDarkNet-YOLOv5l model for the mechanical arm of electric work vehicle reaches 80.02%, which is better than GhostNet-YOLOv5l, MobileNetV3-YOLOv5l and ShuffleNetV2-YOLOv5l, and the prediction for the rotation angle of mechanical arm is also the closest to the real value.

**Key words:** rotating target detection; angle prediction; circular smooth label; power operation

## 0 引言

近些年在变电站中进行电力作业时,常有安全事故发生,经过研究分析<sup>[1]</sup>,发现管理责任缺失、检修监管不严和安全意识薄弱为事故发生的主要原因。

**基金项目:**四川省科技厅项目(2020JDJQ0075);国网四川省电力公司科技项目(521997190016);四川轻化工大学研究生创新基金(Y2021068)

因。目前,大多数电力作业的安全监测研究都是针对电力施工人员开发的监测系统。文献[2]提出使用方向梯度直方图技术(histogram of oriented gradient, HOG)提取电力现场作业人员的特征,对现场人员的危险行为进行警告。随着人工智能的飞速发展,深度学习算法在目标检测领域已成为目前的主流算法。文献[3]使用 OpenPose 算法检测人体关键点,并提出基于人体关键点坐标的人员行为

分类方法,对存在危险行为的人员进行警告。这些方法在很大程度上解决了电力施工人员穿戴不规范和操作违规的问题。但是在变电站的作业环境中,不仅有电力工作人员,还有常用的电力作业车,在不同的电力施工现场和执行不同施工任务时,为保障作业的安全性,对电力作业车的作业姿态<sup>[4]</sup>都有着不同的要求,然而目前却缺乏监测电力作业车安全作业的相关研究。

目前,大多数关于旋转目标的检测方法<sup>[5]</sup>都来源于遥感领域,主要检测卫星图片中的目标。文献[6]提出了旋转区域卷积神经网络(rotatable region convolutional neural network, RRCNN)旋转目标检测算法,添加了旋转感兴趣区域(rotation region of interest, RROI)加强对目标的特征提取,提高了检测精度。文献[7]提出旋转目标检测网络(rotatable object detection network, R3-Net)算法,设计了一种边界感知旋转锚框(boundary-aware rotatable anchor, BAR),引入旋转区域敏感(rotatable position sensitive, RPS)池化,保留了目标位置信息和方向信息。文献[8-9]提出了一种针对小、杂乱和旋转物体检测算法(detection for small, cluttered and rotated objects, SCRDet)和精练单阶段检测算法(refined single stage detector, R3Det),SCRDet 算法改进 Smooth L1 损失函数应用于边界框的回归问题,但是仍然未能解决目标旋转角度的边界问题;R3Det 算法以 RetinaNet 为基础,增加了一个特征精炼模块(feature refinement module, FRM),提高了对目标的检测性能。文献[10]提出了新的精练单阶段检测算法(refined single stage detector, R4Det),设计了一个递归特征金字塔模块(recursive feature pyramid, RFP),增加了递归连接块(recursive connection block, RCB),在一定程度上提高了检测性能。

以上提到的算法都存在着检测精度不高和检测速度慢的问题。近年来,YOLO 系列算法不断更新迭代,已经从 YOLOv1 发展到了 YOLOv5,在检测速度和精度上都有更好的表现。不少学者也开始将 YOLO 算法应用到旋转目标检测中。文献[11]在 YOLOv5 的基础上采用八参数标记方法标记数据,引入了 Pixels-IoU(PIoU)函数,提高了网络的检测精度。文献[12]提出了一种基于 R-YOLO 的检测方法,采用五参数标记方法标记数据,重新设计了边框的回归方式、角度损失函数,并将主干网络更换为 MobileNet,提升了网络的检测速度。

下面以电力作业车的机械臂作为研究对象,采用长边定义法与环形平滑标签结合的数据标注方法,使用改进的 YOLOv5 算法对电力作业车的机械臂进行作业角度检测,实现对电力作业车的危险操作预警。

## 1 网络设计

YOLOv5 结合了先前 4 个版本的优点,在检测速度和精度上都有更好的表现。YOLOv5 网络可以分为 Input、Backbone、Neck、Prediction 4 个部分,网络结构如图 1 所示。

Input 即输入端,其作用是对输入网络的数据进行增强以及自适应锚框计算。数据增强的操作主要有 HSV(调节图像的色调、饱和度和亮度)、degrees(对图像进行旋转)、translate(对图像进行平移)、scale(缩放图像)、shear(剪切图像)、flipud 和 fliplr(对图像上下翻转和水平翻转)、mosaic(将 4 张图像拼接在一起)。在 YOLO 算法中,针对不同的数据集都有初始设定的锚框 anchor,在进行网络训练的时候,YOLO 算法会在初始锚框的基础上输出预

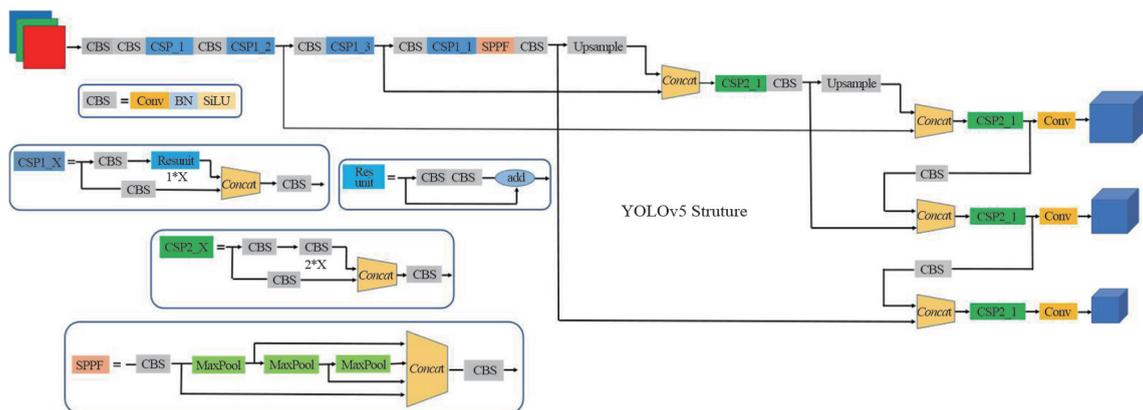


图 1 YOLOv5 V6.0 网络结构

测框,然后和目标的真实框进行对比,通过计算差距,更新锚框参数。

BackBone 主要结构为 CSP-DarkNet 结构, YOLOv5 V6.0 网络设计了两种 CSP 结构以及 SPPF 结构。CSP1\_X 结构用于 Backbone 中,以加强网络的特征提取能力,CSP2\_X 用于 Neck 中。SPPF 结构在 SPP 结构的首尾各增加了 1 个 CBS 模块,虽然两种结构的作用一样,但是 SPPF 结构的运行效率更高,消耗的时间更少。

Neck 的主要结构为特征金字塔网络+判别器结构,其中的 CSP2\_X 结构加强了网络的特征融合能力。

Prediction 部分完成对大、中、小 3 种不同尺度的目标预测。

### 1.1 anchor 设计

一般来说,基于深度学习的一阶段和二阶段目标检测算法采取的都是水平 anchor。但是在检测一些带有角度的大横纵比目标时,水平 anchor 对检测目标的框选不够准确,在 anchor 中会出现多余的语义信息,导致主干网络不能精确地提取目标特征或者提取出多余的目标特征,最后使检测的精度下降。针对电力作业车机械臂这种横纵比较大的检测对象,采用旋转 anchor 对进行框选,可以有效地提高网络的检测精度。水平检测框与旋转检测框框选效果对比,如图 2 所示。



(a) 水平检测框 (b) 旋转检测框

图 2 水平检测框与旋转检测框检测效果

对原网络中的 anchor 进行重新设置,将其改用五参数方法<sup>[13]</sup>表示。五参数分别为  $x$ 、 $y$ 、 $w$ 、 $h$ 、 $\theta$ ,其中  $(x, y)$  为旋转矩形框的中心坐标,  $w$  和  $h$  分别为矩形框的短边和长边,采用长边定义法表示  $\theta$ ,即长边  $h$  与  $x$  轴的夹角为  $\theta$ ,如图 3 所示,  $\theta$  的范围为  $[-90^\circ, 90^\circ]$ 。

通常情况下要想降低检测模型的拟合难度,需要使用设定好的 anchor 对目标的真实框进行拟合,

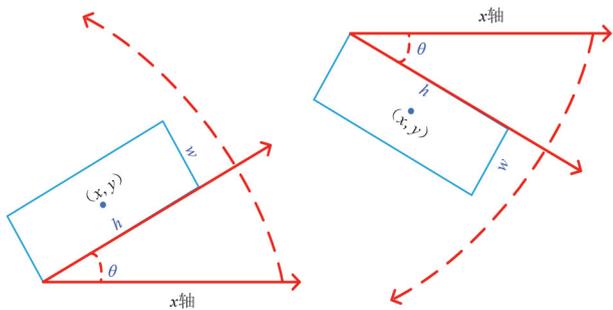


图 3 长边定义法

该操作会使大量增加 anchor 的数量,增加整个网络的训练时间。为了让 anchor 与真实框的拟合更快速,对自制的电力检修车数据集中标注的真实框采用 K-means 聚类<sup>[14]</sup>的方法重新生成 anchor 大小。查阅官方的 YOLOv5 源代码得到 YOLOv5 算法的初始 anchor 设置为  $[10, 13, 16, 30, 33, 23]$ 、 $[30, 61, 62, 45, 59, 119]$ 、 $[116, 90, 156, 198, 373, 326]$ ,通过 K-means 聚类方法重新生成的 anchor 大小为  $[315, 45, 381, 53, 315, 75]$ 、 $[488, 49, 499, 81, 732, 76]$ 、 $[620, 118, 772, 191, 923, 163]$ ,将重新生成的 anchor 大小写入到 yaml 文件中。

### 1.2 损失函数

损失函数部分主要为 class 分类损失、 $\theta$  角度损失、bbox 边框回归损失、置信度损失。其中  $\theta$  角度损失中角度  $\theta$  的边界问题是关键。由于用于训练的数据目标参数具有周期性,在周期改变的边界处会使损失值突然变大,导致整个网络的训练难度加大。例如,在常规情况下,预测得到的  $\theta$  为  $78^\circ$ ,目标旋转角度  $\theta$  的真实值为  $79^\circ$ ,那么网络得到的角度距离为  $1^\circ$ ;在边界情况下,预测得到的  $\theta$  为  $79^\circ$ ,目标旋转角度  $\theta$  的真实值为  $-80^\circ$ ,那么网络得到的角度距离为  $179^\circ$ ,然而在真实情况下预测值与真实值的角度距离仅相差  $1^\circ$ 。

参考了文献<sup>[15]</sup>提出的环形平滑标签(circular smooth label, CSL)方法,CSL 的示意图见图 4,将角

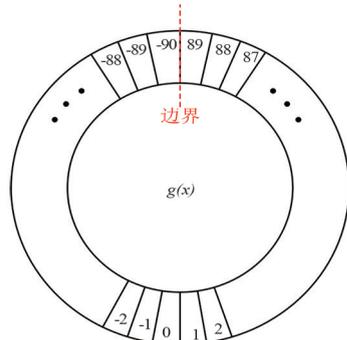


图 4 CSL 结构

度  $\theta$  的边界回归问题转化为分类问题,在定义的角度范围内划分类别,把连续的问题进行离散化处理,回避了边界问题。

CSL 的表达式如式(1)所示。

$$\text{CSL}(x) = \begin{cases} g(x) & \theta - r < x < \theta + r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $g(x)$  为窗口函数,窗口的大小由半径  $r$  来决定。窗口函数  $g(x)$  需要满足周期性、对称性、单调性、有最大值的必要条件。窗口函数能够估计预测标签与真实标签之间的角度距离信息,在一定的角度范围内,网络得出的预测值越接近真实值,角度信息的损失值就越小。这里选用高斯函数作为窗口函数,半径  $r$  设置为 6。

总体的损失函数设计如下: class 分类损失不需要改变;  $\theta$  角度损失设置为角度分类损失,采用和分类损失相同的二元交叉熵损失函数 BCEWithLogitsLoss; 由于将角度  $\theta$  当做分类来处理,旋转框的角度信息与边框参数信息不再关联,旋转框的损失可以分为角度损失和水平框损失,边框的损失函数仍然采用 IOU/GIOU/CIU/DIOU 损失函数。置信度分支的权重系数可以选择水平框 IOU/GIOU/CIU/DIOU,也可以选择旋转框 IOU。通过实验对比,选择水平框的 IOU 进行网络训练时速度较快,并且预测框的置信度较高,所以采用水平框 IOU/GIOU/CIU/DIOU 作为置信度分支的权重系数,如式(2)所示。

$$L_{\text{total}} = L_{\text{cls}} + L_{\text{angle}} + L_{\text{box}} + L_{\text{obj}} \quad (2)$$

式中:  $L_{\text{total}}$  为网络训练总损失;  $L_{\text{cls}}$  为分类损失;  $L_{\text{angle}}$  为角度损失;  $L_{\text{box}}$  为旋转框位置损失;  $L_{\text{obj}}$  为置信度损失。

## 2 实验结果及对比

### 2.1 实验环境

所使用的服务器参数为: CPU 为 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2695 v4 @ 2.10 GHz; RAM 大小为 256 GB; 操作系统为 Windows 10 专业版; GPU 为 Nvidia TITAN Xp 12 GB。软件配置为 CUDA 10.2、Anaconda 3、PyCharm Community、Python 3.8、Microsoft Visual Studio 2017 等,深度学习框架为 Pytorch。

### 2.2 实验数据及数据处理

由于未能查找到电力作业车相关的数据集,采用自制的电力作业车数据集,数据集的格式参考遥感目标检测数据集 DOTA。首先,采用 RoLabelImg

软件对电力作业车机械臂进行标注;然后,将标注好的 xml 文件转化为 DOTA 数据集的 txt 格式,转化公式如式(3)~式(9)所示;最后,转化为 YOLO 网络训练数据的格式。

$$(x, y, w, h, -\theta) \rightarrow (x_i, y_i) \quad (3)$$

$$(x_0, y_0) =$$

$$\left(x - \frac{w}{2} \cos \theta - \frac{h}{2} \sin \theta, y + \frac{w}{2} \sin \theta - \frac{h}{2} \cos \theta\right) \quad (4)$$

$$(x_1, y_1) =$$

$$\left(x + \frac{w}{2} \cos \theta - \frac{h}{2} \sin \theta, y - \frac{w}{2} \sin \theta - \frac{h}{2} \cos \theta\right) \quad (5)$$

$$(x_2, y_2) =$$

$$\left(x + \frac{w}{2} \cos \theta + \frac{h}{2} \sin \theta, y - \frac{w}{2} \sin \theta + \frac{h}{2} \cos \theta\right) \quad (6)$$

$$(x_3, y_3) =$$

$$\left(x - \frac{w}{2} \cos \theta + \frac{h}{2} \sin \theta, y + \frac{w}{2} \sin \theta + \frac{h}{2} \cos \theta\right) \quad (7)$$

式中,  $(x_i, y_i)$  为转化后的坐标,最终得到的标签文件格式为

$$(\text{class\_id } x \ y \ w \ h \ \theta) \quad \theta \in [0, 180)$$

所自制的数据集共包含 1200 张折臂式电力作业车图片,共有两个分类类别: arma 和 armb,其中 arma 为电力作业车的上机械臂; armb 为电力作业车的下机械臂,具体标识如图 5 所示。



图 5 机械臂标识

将数据集按照 4 : 1 : 1 划分为训练集、验证集、测试集。为了使训练集和验证集中 arma 和 armb 的类别数量处于相对平衡的水平,避免数据过少产生

的过拟合问题,使用 YOLOv5 算法中的数据增强方法,对数据集中的训练集合验证集进行扩充。扩充前的训练集数量为 800 张图片,验证集的数量为 200 张图片;扩充后的训练集数量为 2979 张图片,验证集的数量为 762 张图片。

### 2.3 性能分析

为了检验所提 YOLOv5 旋转目标检测算法的检测效果,设置了 3 组对比实验,将主干网络分别更换为 GhostNet、MobileNetV3、ShuffleNetV2。设置训练次数为 300 次,优化器选择 adam,angle loss gain 设置为 0.8,angle BCELoss positive\_weight 设置为 1.0,初始学习率设置为 0.001,momentum 设置为 0.937。

实验得到的损失函数图像和评价指标得分见图 6 和表 1。

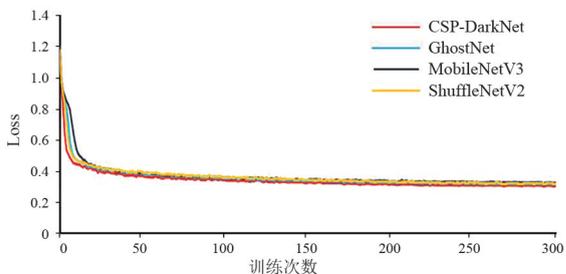


图 6 损失函数

通过损失函数的曲线图可以得出,以 CSP-DarkNet 作为特征提取的主干网络,网络的收敛速度更快,在

训练后 20 次左右开始趋于平缓;训练的损失值下降也更快,并且损失值始终低于 GhostNet、MobileNetV3、ShuffleNetV2 作为主干网络时的损失值。表 1 是各个网络在测试集上单个目标平均精度 (average precision, AP) 和总目标平均精度 (mean average precision, mAP) 的值。

表 1 各网络测试结果

网络	AP/%		mAP/%
	arma	armb	
CSP-DarkNet	80.55	79.47	80.02
GhostNet	80.37	70.96	75.67
MobileNetV3	71.00	70.74	70.87
ShuffleNetV2	79.87	70.59	75.23

由表 1 可知,CSP-DarkNet-YOLOv5 模型在电力作业车测试集上对机械臂 arma 和 armb 的平均检测精度分别达到了 80.55% 和 79.47%,相较于检测精度较差的 MobileNetV3-YOLOv5 模型,检测的总体平均精度提高了 9.15%。各网络的检测效果如图 7 所示。

由图 7 可知,CSP-DarkNet-YOLOv5 模型的检测效果最好,能够准确地完成对机械臂 arma 和 armb 的检测,而其余的模型对机械臂 arma 和 armb 均存在漏检情况。以图 8 为例,各网络对机械臂 arma 和 armb 的角度预测结果见表 2。

图 8 中的电力作业车进行标注后的机械臂 arma 和 armb 真实旋转角度分别为 19° 和 76°。由表 2



图 7 YOLOv5 在各网络的检测效果



图 8 角度检测样本

表 2 各网络角度预测结果

网络	$\theta_{\text{arma}} / (^\circ)$	$\theta_{\text{armb}} / (^\circ)$
CSP-DarkNet	19	77
GhostNet	20	78
MobieleNetV3	20	77
ShuffleNetV2	17	78

可知 CSP-DarkNet-YOLOv5 模型对电力作业车机械臂的角度预测更符合真实角度。

### 3 结 论

上面设计了一种基于 YOLOv5 的电力作业车机械臂旋转检测算法。在 YOLOv5 网络的基础上,修改了样本数据的标注方法,采用环形平滑标签+长边定义的方式对样本进行标注,将角度  $\theta$  的边界回归问题转化为分类问题,解决了网络在训练时角度  $\theta$  周期性变化产生的较大损失值问题。通过实验证明,修改后的 CSP-DarkNet-YOLOv5 模型在自制的电力作业车数据上有着较高的检测精度,并且能够准确地完成对电力作业车机械臂  $\text{arma}$  和  $\text{armb}$  的检测任务,以及机械臂  $\text{arma}$  和  $\text{armb}$  的角度预测任务。该算法可以为电力施工现场中电力作业车的预警工作提供参考,避免安全事故的发生。

#### 参考文献

- [1] 冯圣文.变电站安全作业防护管理系统设计与实现[D].成都:电子科技大学,2020.
- [2] 颜廷良.基于机器学习和图像识别的电力作业现场安全监督[J].光源与照明,2021(6):147-148.
- [3] 杨泉.基于机器学习的电力作业人员行为识别研究[D].成都:电子科技大学,2020.
- [4] 戴乔旭,莫仲辉,李杨,等.一种高空作业车防撞预警

装置的设计与应用[J].电力安全技术,2020,22(6):48-51.

- [5] 安胜彪,娄慧儒,陈书旺,等.基于深度学习的旋转目标检测方法研究进展[J].电子测量技术,2021,44(21):168-178.
- [6] Zikun LIU, Jingao HU, Lubin WENG, et al. Rotated Region Based CNN for Ship Detection[C].2017 IEEE International Conference on Image Processing, Beijing: IEEE, 2017: 900-904.
- [7] Qingpeng LI, Lichao MOU, Qizhi XU, et al. R<sup>3</sup>-Net: A Deep Network for Multi-Oriented Vehicle Detection in Aerial Images and Videos[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(7): 5028-5042.
- [8] Xue YANG, Junchi YAN, Wenglong LIAO, et al. SCRDet++: Detecting Small, Cluttered and Rotated Objects via Instance-Level Feature Denoising and Rotation Loss Smoothing[J/OL].(2020-4-28)[2021-10-09]. arXiv:2004.13316v2.
- [9] Xue YANG, Qingqing LIU, Junchi YAN, et al. R3Det: Refined Single-Stage Detector with Feature Refinement for Rotating Object[J/OL].(2020-2-21)[2021-10-09]. arXiv:1908.05612v5.
- [10] Peng SUN, Yongbin ZHENG, Zhongtan ZHOU, et al. R<sup>4</sup>Det: Refined single-stage detector with feature recursion and refinement for rotating object detection in aerial images[J]. Image and Vision Computing, 2020, 103: 104036.
- [11] 冯素婷,盛智勇,后兴海,等.基于旋转框回归的YOLOV5 遥感图像车辆目标检测[C]//第十五届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集.中国高科技产业化研究会智能信息处理产业化分会,2022:328-331.
- [12] 陈俊.基于 R-YOLO 的多源遥感图像海面目标融合检测算法研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [13] 赵鹏博.航空遥感图像目标检测方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [14] 陈玉明,蔡国强,卢俊文,等.一种邻域粒 K 均值聚类方法[J/OL].控制与决策:1-7[2022-05-31]. DOI:10.13195/j.kzyjc.2021.1553.
- [15] Xue YANG, Junchi YAN. On the Arbitrary-Oriented Object Detection: Classification Based Approaches Revisited[J]. Internadional Journal of Computer Vision, 2022, 130: 1340-1365.

作者简介:

张劲松(1997),男,硕士研究生,研究方向为图像处理。

(收稿日期:2022-04-24)

# 海南电网电压暂降监测数据特征分析

方 铭<sup>1,2</sup>, 李天楚<sup>1,2</sup>

(1.海南电网有限责任公司电力科学研究院,海南 海口 570311;

2.海南省电网理化分析重点实验室,海南 海口 570311)

**摘要:**电压暂降监测数据特征分析是明确地区电压暂降水平的关键手段之一,可为电压暂降治理及预防提供基本信息。以海南电网电能质量监测平台的电压暂降监测数据为基础,对电压暂降波形幅值、持续时间、相位跳变和暂降类型4个特征量进行计算和分析。结果表明:该地区70%的实测暂降的幅值高于0.7 pu,持续时间小于0.1 s;90%的实测电压暂降的相位跳变在 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 内,可推测该地区敏感设备可以躲过绝大多数因相位跳变而导致设备故障的暂降事件;60%的实测电压暂降的暂降类型为单相接地故障导致的D型,A型对称暂降仅占比3.79%。所分析的数据和结果可为电网侧和用户侧的电压暂降治理决策、设备参数设置和调试相关参数提供技术基础。

**关键词:**电压暂降;监测数据;暂降类型;相位跳变;特征计算

中图分类号:TM 713 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)03-0035-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220306

## Data Characteristic Analysis of Monitored Voltage Sags in Hainan Power Grid

FANG Ming<sup>1,2</sup>, LI Tianchu<sup>1,2</sup>

(1.Electric Power Research Institute of Hainan Power Grid Corporation Ltd., Haikou

570311, Hainan, China; 2.Key Laboratory of Physical and Chemical Analysis

for Hainan Power Grid, Haikou 570311, Hainan, China)

**Abstract:** The characteristic analysis of voltage sag monitoring data is one of the key means to understand the voltage sag level in the region, which can provide the basic information for control and prevention of voltage sag. Based on the voltage sag monitoring data of power quality monitoring platform of Hainan power grid, the voltage sag waveform amplitude and duration, phase angle jump and sag type are calculated and analyzed. The results show that: the amplitude of 70% measured voltage sag is higher than 0.7 pu, and the duration is less than 0.1 s. 90% of the measured voltage sags are in the range of  $[-10^\circ, 10^\circ]$ , which can be inferred that most of the sensitive equipment in this area can avoid the sags causing equipment failure due to the phase angle jump. 60% of the measured voltage sags are type D caused by single-phase ground fault, and only 3.79% are symmetrical sags type A. The analysis data and results can provide a technical basis for the decision-making of voltage sag control in grid side and user side, and for the setting and commissioning of relevant parameters by equipment manufacturers.

**Key words:** voltage sag; monitoring data; sag type; phase angle jump; characteristic calculation

## 0 引言

海南自由贸易港建设总体方案的实施,必然带动大量高精尖工业用户的投资入驻,供电质量是发展重要保障。微机、计算机、芯片、机器人等高端

基金项目:海南电网科技项目(073000KK52190007)

制造业以及自动化智能技术等高新产业对电压暂降非常敏感,可能造成工业过程中断导致用户产生巨大的经济损失<sup>[1-3]</sup>。以海南电网近三年来的监测数据为基础,分析海南电网电压暂降特征,是科学解决电压暂降问题的前提。

电压暂降被定义为电压幅值在某一时刻开始减小,经过一定时间恢复到标称电压的暂态现象。国

际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)将电压暂降事件定义为电压有效值下降到正常工作电压的 1%~90%,持续时间为 0.01 s~1 min 的暂态现象<sup>[4]</sup>。电压暂降是电力系统正常运行不可避免的电能质量现象,主要由电网短路故障、变压器激磁和大电机启动等原因造成,导致工业用户敏感设备跳停,用户抱怨严重。电压暂降有幅值、持续时间、相位跳变、波形点等一系列单次事件特征。各特征偏离正常值,导致敏感设备不能在额定参数范围内正常工作,进而发生设备跳停事故<sup>[5]</sup>。治理各地区电压暂降现象,需要从数据源入手展开分析。

现有研究围绕电压暂降发生、危害等方面展开<sup>[6-7]</sup>。文献[8-9]从统计描述的角度对暂降特征量进行了深度分析。CIGRE C4.110 工作组对不同暂降源导致的电压暂降波形进行了详细划分<sup>[10]</sup>,从波形特点映射出暂降原因,有助于对敏感用户进行后果评价及责任划分<sup>[11-12]</sup>。基于幅值和持续时间的电压暂降耐受曲线(voltage tolerance curve, VTC),是刻画敏感电压暂降设备耐受能力的主要手段。文献[13-15]在进行敏感设备耐受能力测试时,考虑了相位跳变的影响,设置不同相位跳变参数进行耐受试验,研究其对敏感设备的影响程度。电压暂降类型以三相电压幅值和相位进行刻画,不同类型具有不同的幅值和相位特征,对敏感用户的影响也不同。文献[16]在进行敏感设备耐受力测试时,也考虑了暂降类型。对暂降特征量进行统计分析,有助于揭示暂降原因,了解地区暂降水平,为暂降治理及预防提供基本依据。

下面采用数据统计分析的思想,考虑幅值、持续时间、相位跳变和暂降类型 4 个特征量,对海南电网 5 个主要城市的电压暂降监测数据进行特征计算和分析,揭示了各地区导致暂降的主要原因及其比例,以及暂降幅值和持续时间的分布情况。通过对相位跳变的统计分析,预测了该地区敏感设备受相位跳变影响情况;最后,计算和分析了各地区暂降类型情况,为电网侧和用户侧的电压暂降治理提供技术依据。

## 1 电压暂降监测数据概况

目前,中国主流监测装置的暂降触发算法统一

采用 IEC 61000-4-30 的标准<sup>[4]</sup>,记录的波形包括了暂降开始前 5 个周期和暂降结束后 5 个周期。筛选电压中断、噪声干扰较大、波形紊乱的数据,所采用的电压暂降监测数据共 2786 条,来源于 2018 年 1 月 16 日至 2020 年 3 月 30 日海南省三亚供电局、海口供电局、文昌供电局、琼海供电局和儋州供电局共 5 个地市局所属的 17 个变电站监测平台,包含 110 kV 和 220 kV 两个电压等级。

经统计,5 个城市分别记录到 685 次、858 次、332 次、234 次、677 次电压暂降;两个电压等级分别监测到 729 次和 2057 次电压暂降。基于已有监测数据,对该地区电压暂降幅值、持续时间、相位跳变、电压暂降类型等特征量进行分析,探明海南地区近两年的电能质量扰动状态,为电压暂降治理及预防提供关键决策依据。

## 2 基于实测数据的电压暂降源分析

### 2.1 电压暂降原因

造成电压暂降的原因包括短路故障、变压器激磁、大电动机启动等;如果在非有效接地系统发生短路故障,导致电压暂降的同时,还会发生电压暂升。不同电压暂降源导致的电压暂降波形不同,根据波形特征可推测某地区电压暂降的主要原因,为暂降治理提供相关信息。

1)以三亚供电局监测平台某条监测数据为例,三相电压有效值波形呈矩形,如图 1 所示。黑色、蓝色和红色曲线分别表示 A、B、C 相电压有效值。本次暂降事件的 B 相电压幅值在 1 个周期的时间内从额定电压瞬间跌落至 1.5 kV 左右,并持续约 53 个周期,再恢复为额定电压。而 A、C 相电压没有发生跌落,可以判断此次暂降事件是由单相(B 相)接地故障造成。

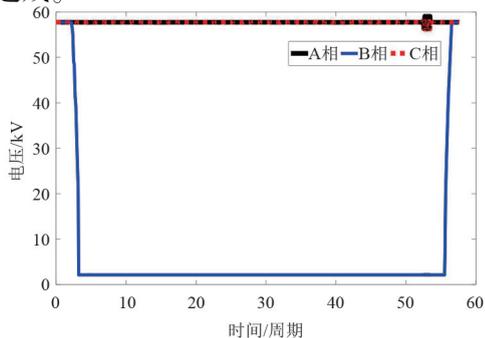


图 1 短路故障的电压波形

2) 变压器投切是电网公司运行方式改变、设备检修等不可避免的生产安排。当某台变压器投入时,产生较大励磁电流,导致临近的正常供电母线发生电压暂降,其有效值波形示例如图2所示。当变压器投运时,瞬间汲取大电流,导致电压突然跌落,而后随着电流的缓慢衰减,电压逐渐恢复。变压器激磁导致的电压暂降严重程度低于绝大多数的短路故障造成的后果,电压有效值跌落一般不会低于80%,基本不会导致变频器、中控电脑等敏感设备跳停。

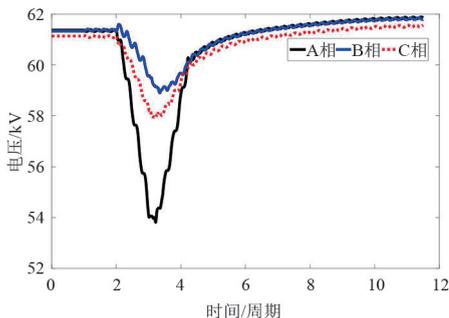


图2 变压器的激磁波形

3) 用户的大型感应电动机在启动的时候,电动机汲取大电流,转子转速从0升至额定值,整个升速过程约持续十几秒至几十秒,感应电动机所接母线的电压会在电动机启动瞬间有大幅的跌落。随着转子转速提升,电压缓慢恢复至额定值或接近额定值,恢复过程较为平缓,三相电压有效值的幅值基本相同。如图3所示为大型感应电动机启动导致的电压暂降,明显可见陡峭的发生过程和较平缓的恢复过程。

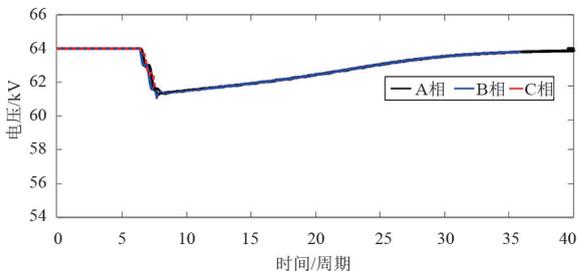


图3 大型感应电动机启动导致的电压暂降波形

4) 非有效接地系统中发生短路故障时,非故障相发生电压暂升现象。实际工程中往往直接称伴随暂降的暂升现象为电压暂升,一般默认电压暂升发生时,必定有一相或两相发生暂降。某实测电压暂升波形如图4所示。C相电压幅值在第6个周期时上升至大约1.1 pu, B相电压上升至1.03 pu,而A

相电压跌落至0.87 pu,推测该事件是由较远端发生A相接地故障导致。

## 2.2 实测数据统计

剔除较混乱、不易判别暂降原因的波形,分不同供区对海南电网实测的2455条电压暂降监测数据进行分析,结果如表1所示。统计短路故障时没有考虑电压暂升,将电压暂升进行单独划分。变压器激磁和电动机启动造成的暂降事件较多,占78%以上。因为监测点主要安装在110 kV、220 kV变电站,系统接地方式多为有效接地,故记录的电压暂升事件非常少。供电局需要重点关注变压器激磁和电机启动造成的暂降及其影响。

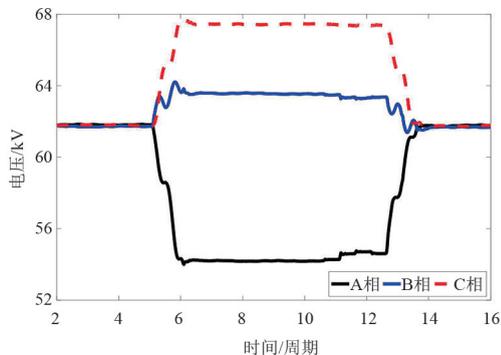


图4 电压暂降期间伴随暂升的波形

表1 不同电压暂降特征频次统计 单位:次

特征类型	三亚	海口	文昌	琼海	儋州
短路故障(暂降)	92	130	42	24	104
变压器激磁	324	425	168	97	326
电动机启动	155	185	88	43	114
电压暂升	21	75	10	8	22
总计	592	817	308	172	566

## 3 电压暂降特征量计算与分析

电压暂降特征量是多维度刻画暂降事件的物理量,包括幅值、持续时间、相位跳变、暂降类型、暂降频次等。对海南电网电压暂降监测数据进行特征量计算和分析,明确近几年海南电网的电压暂降信息,为后续暂降事件评估和治理决策提供有力的数据支撑。

### 3.1 幅值和持续时间计算与分析

监测到的暂降数据为三相瞬时电压,根据监测终端的品牌、型号和设置的不同,实测数据每周期的采样率包括128点、256点和512点3种。应用

式(1)计算各相电压有效值,三相波形最低的电压幅值即为该事件的暂降幅值。

$$V_{\text{rms}}(i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V(i)^2} \quad (1)$$

式中: $N$ 为每周期的采样点数; $V(i)$ 为采样的瞬时电压。

2786组数据的电压等级包括110 kV和220 kV,本节将电压幅值区间 $[0,0.9]$ 分为9个子区间,并考虑幅值大于1.1 pu的电压暂升,分不同电压等级对三相电压幅值进行统计分析,结果见表2。110 kV和220 kV电网各相暂降幅值分布规律大致相同,超过70%的暂降事件的幅值高于0.7 pu。一般来讲,幅值高于0.8 pu时,不会对敏感负荷造成影响;但是,某些低压脱扣器、变频器的保护设置在0.7~0.8 pu,所以这个区间的电压暂降需要重点关注。低于0.7 pu的电压暂降一般都会导致敏感设备跳停,需要重点关注敏感负荷接入处低于0.7 pu的暂降频次,研究针对性的治理方案。110 kV电网发生电压暂升的频次非常少,基本上都集中在220 kV电网,需要进一步明确具体的变电站及发生原因。

表2 电压暂降幅值分区间的暂降频次统计

幅值区间/(pu)	110 kV			220 kV		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
[0,0.1)	8	18	5	24	17	33
[0.1,0.2)	42	38	8	32	25	15
[0.2,0.3)	38	52	34	55	32	57
[0.3,0.4)	67	87	57	52	61	83
[0.4,0.5)	81	74	62	101	89	98
[0.5,0.6)	117	92	101	131	140	152
[0.6,0.7)	194	254	311	211	173	254
[0.7,0.8)	457	421	522	413	404	428
[0.8,0.9]	1522	1487	1555	1511	1621	1477
>1.1	10	11	12	55	58	43

实测数据中,暂降持续时间最长为54 s,最短为0.01 s,将 $[0.01,60]$  s分为6个区间,统计各区间的暂降事件数量,见表3。

从表3可知,两个电压等级的绝大多数暂降持续时间都集中在0.01~0.10 s的时间范围内,超过0.50 s的暂降发生次数较少,这与电力公司的保护装置动作时间设置有关,一般越高电压等级的电网,保护动作就越迅速。快速切除故障从而减小

暂降持续时间,是降低电压暂降危害的一种直接方式。

表3 电压暂降持续时间分区间的暂降频次统计

持续时间区间/s	暂降频次/次	
	110 kV	220 kV
[0.01,0.05)	189	514
[0.05,0.10)	474	1330
[0.10,0.50)	57	112
[0.50,1)	7	22
[1,5)	1	35
[5,60]	0	45

对2786组监测数据分不同幅值和持续时间区间进行统计,结果如图5所示。很明显,暂降幅值越高,持续时间越短,暂降频次越密集,且绝大多数暂降幅值介于0.8~0.9 pu,持续时间介于0.01~0.1 s,这些暂降都不会对敏感工业用户造成影响。需要关注的是幅值较低、持续时间较长的电压暂降事件。

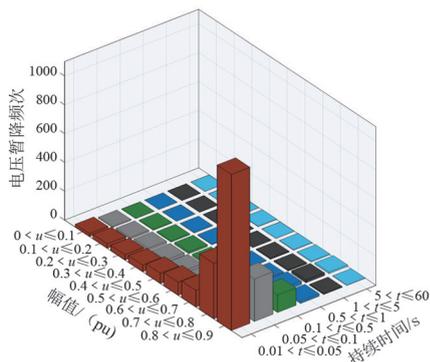


图5 不同幅值和持续时间的电压暂降频次实际统计

### 3.2 相位跳变计算与分析

理想情况下,以A相相位为参考量,A、B、C三相电压相位分别为 $0^\circ$ 、 $-120^\circ$ 、 $120^\circ$ ,当发生电压暂降时,往往伴随着不同程度的相位跳变<sup>[17]</sup>。电压暂降期间相位跳变产生的根本原因是公共连接点到故障位置之间的馈线阻抗与系统阻抗比不同。根据经验,电力系统相位跳变值一般在 $[-10^\circ, 60^\circ]$ 的范围内,极个别暂降波形的相位跳变值可能超过该范围。

暂降期间相角的变化可能导致某些受角度控制的设备发生误动,如变流器、逆变器等<sup>[18-19]</sup>;对其他类型的敏感设备,没有重大的影响。明确某区域电压暂降时相位跳变的范围,是治理电压暂降影响和危害的重要信息。

暂降期间的相位跳变存在一定波动,这里计算

暂降期间三相相位跳变的绝对值最大值<sup>[20]</sup>。将相位跳变范围 $[-30^\circ, 70^\circ]$ 分为8个子区间,统计每相电压波形相位跳变情况,如表4所示。可见,各相的相位跳变值基本上都集中在 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 的区间内,占90%以上,并呈现出相位跳变越大,样本数量越少的规律。如果该地区敏感设备的相位跳变耐受范围在 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 时,便可以躲过绝大多数因相位跳变而导致设备故障的暂降事件。

表4 电压暂降相位跳变值分区间频次统计

相位跳变区间/ $(^\circ)$	暂降频次/次		
	A相	B相	C相
$[-30, 20)$	5	2	5
$[-20, -10)$	88	39	97
$[-10, 0)$	1661	1592	1762
$[0, 10)$	952	1033	892
$[10, 20)$	38	78	6
$[20, 30)$	29	28	7
$[30, 40)$	5	8	9
$[40, 50)$	4	2	6
$[50, 60)$	4	3	2
$[60, 70]$	0	1	0

### 3.3 暂降/暂升类型计算与分析

电压暂降/暂升因其跌落、升高相不同,有不同的分类方法,采用文献[21]提出的包含A、C、D、H、I的分类方法。该方法将电压暂降/暂升分为三相对称暂降、两相暂降、单相暂降、两相暂升、单相暂升,其三相对称电压矢量图如图6所示。

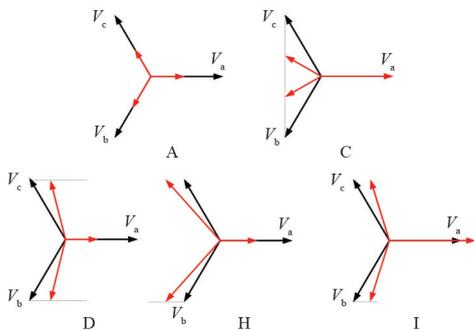


图6 电压暂降/暂升类型

电压暂降/暂升的类型是进行电网侧和用户侧电能质量治理的关键信息。电压暂降和暂升类型与短路故障类型密切相关,例如,A类型暂降由三相对称短路故障造成,C类型暂降由相间短路故障造成,非有效接地系统中,非故障相电压发生暂升。开展电压暂降和暂升类型计算和分析,不仅

有助于明确该地区短路故障情况,有针对性制定暂降预防及治理决策方案,还能为用户侧电压暂降治理提供信息。在用户侧,主要采用动态电压恢复器、不间断电源等补偿措施进行电压暂降治理,明确暂降类型,有助于敏感用户配置补偿装置的容量和相关技术参数。例如,当接入点的大多数暂降是B类或者D类时,说明有两相电压未发生明显跌落,补偿容量可考虑按被补偿设备容量的三分之一或更小来进行设计。

由于电压暂降类型是基于短路故障进行刻画,本次分析不包括由变压器激磁、电动机启动等非短路故障导致的实测电压暂降数据。应用文献[21]提出的欧式距离法计算电压暂降和暂升类型,分不同地区对528组短路故障数据进行类型计算与分析,结果如表5所示。

表5 电压暂降和暂升类型统计

电压暂降和暂升类型	暂降频次/次				
	三亚	海口	文昌	琼海	儋州
A型	3	6	4	3	4
C型	11	18	7	4	15
D型	78	106	31	17	85
H型	10	40	4	2	7
I型	11	35	6	6	15
总计	113	205	52	32	126

由表5可知:各城市发生的D型暂降频次最高,共计占60%,表明该地区单相接地故障发生概率最大;三相对称故障导致的A型暂降最少,仅占3.79%。这一结果符合短路故障的基本特性。相比之下,海口供电局发生的电压暂升频次较高,需要排查相关原因。虽然A类型的三相对称暂降发生频次低,但是由于其危害严重,电力公司应加强线路运行维护,降低三相短路的故障率。

## 4 结论

依托海南电网电能质量监测平台在5个城市的电压暂降监测数据,对其波形特征进行统计分析,同时从电压暂降特征量中的幅值、持续时间和相位跳变、暂降类型几个方面进行特征计算与分析,得到以下结论:

1)接短路故障、电动机启动、变压器激磁和电压暂升进行暂降源分析,各城市由变压器激磁和电动机启动导致的暂降事件最多,共占样本数

量的 78% 左右,而短路故障和电压暂升事件较少。建议电力公司重点关注大电动机用户的开机方式、调度合理安排变压器投入的作业时间和频次等。

2)按不同电压暂降幅值和持续时间进行分析,70%的实测数据幅值大于 0.7 pu,持续时间在 [0.01, 0.1]s 的数据大约占 90%,幅值越小持续时间越长,样本数量呈递减趋势。

3)相位跳变在  $[-10^\circ, 10^\circ]$  范围内的样本数据大约占 90%,处于大多数敏感设备的耐受范围,可推测该地区受暂降相位跳变影响,发生设备跳停的事故较少。

4)计算和分析 528 组短路故障导致的暂降类型,结果表明 D 型暂降频次最高,推测各地区单相接地故障发生频繁,相间故障导致的 C 型暂降次之。

#### 参考文献

- [1] 张军,浦天宇.多层次电压暂降评价方法研究[J].电力工程技术,2018,37(6):49-54.
- [2] 黄瑞,肖先勇,李国栋,等.敏感设备电压暂降免疫力测试标准与尚需研究的问题[J].中国测试,2015,41(增刊1):32-36.
- [3] 肖先勇,谭秀美,汪颖,等.基于电气特性-物理属性-感知损失的电压暂降经济损失评估[J].中国电机工程学报,2018,38(增刊):105-110.
- [4] Electromagnetic compatibility (EMC) -Part 4-30:Testing and measurement techniques-Power quality measurement method:IEC 61000-4-30[S],2015.
- [5] 汪颖,周杨,莫文雄,等.设备电压暂降耐受能力测试技术分析测试规范建议[J].电力自动化设备,2020,40(2):167-171.
- [6] 浦雨婷,杨洪耕,马晓阳,基于数据挖掘与改进灰靶的电压暂降严重度分析与评估[J].电力系统自动化,2020,44(2):198-213.
- [7] 许丹,黄利军,李献伟,等.基于小波变换的抗噪声电压暂降检测方法研究[J].供用电,2018,35(2):57-62.
- [8] 李伟,丁凯,李琼林,等.省级电能质量监测平台实测电压暂降特征分析[J].水电能源科学,2019,37(10):155-158.
- [9] 司学振,李琼林,杨家莉,等.基于实测数据的电压暂降特性分析[J].电力自动化设备,2017,37(12):144-149.
- [10] CIGRE/CIREN/UIE Joint Working Group C4.110. Voltage Dip Immunity of Equipment and Installations[R]. CIGRE Publications,2010:1-18.

- [11] 丁凯,李伟,谢佳妮,等.电压暂降治理效果评价指标体系及综合评价模型[J].科学技术与工程,2019,19(25):197-203.
- [12] 贾清泉,艾丽,董海艳,等.考虑不确定性的电压暂降不兼容度和影响度评价指标及方法[J].电工技术学报,2017,32(1):48-57.
- [13] 徐永海,韦鹏飞,李晨懿,等.电压暂降相位跳变及其对敏感设备的影响研究[J].电测与仪表,2017,54(21):105-111.
- [14] 徐永海,洪旺松,兰巧倩.电压暂降起始点与相位跳变对交流接触器影响的分析[J].电力系统自动化,2016,40(4):92-98.
- [15] 欧阳森,李翔,刘平,等.低压脱扣器电子电路电压暂降敏感特性试验研究[J].电力自动化设备,2017,37(2):211-218.
- [16] 李晨懿,汪坤,卢文清,等.变频器对不同类型电压暂降的耐受特性研究[J].电测与仪表,2018,55(15):1-7.
- [17] 欧然,肖先勇,吴丹岳,等.三相系统电压暂降的相位跳变检测[J].中国测试,2015,41(6):101-106.
- [18] Isao IYODA, Yoshiki ABE, Toshifumi ISE, et al. A new parameter of voltage sags and its effect on inverters of PV systems surveyed by a newly developed voltage sag generator[C]. IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society,2010.
- [19] Mansour MOHSENI, Syed ISLAM, Mohammad A S MASOUM. Impacts of Symmetrical and Asymmetrical Voltage Sags on DFIG-Based Wind Turbines Considering Phase-Angle Jump, Voltage Recovery and Sag Parameters[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2011,26(5):1587-1598.
- [20] Ying WANG, Math H J BOLLEN, Xianyong XIAO. Calculation of the Phase-Angle-Jump for Voltage Dips in Three-Phase Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2015,30(1):480-487.
- [21] Ying WANG, Huaxi YU, Xianyong XIAO, et al. New method for calculating voltage dip/swell types based on six-dimensional vectors and Euclidean distance [J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2019, 13(18):4206-4213.

#### 作者简介:

方 铭(1988),女,工程师,从事电能质量、电压管理与仪器仪表检定技术研究;

李天楚(1988),女,硕士,高级工程师,从事电能质量、电磁环境与仪器仪表检测技术研究。

(收稿日期:2021-07-29)

# 500 kV 同塔双回输电线路感应电压和感应电流建模分析

唐浩龙, 樊艳, 冯千秀, 牟婷婷

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

**摘要:**考虑到同塔双回输电线路一回运行、一回停运时,在停运线路上可能产生较大的感应电压和感应电流,对检修人员和设备产生一定的安全隐患。为了研究不同运行工况下的感应电压和感应电流,利用 ATP-EMPT 软件建立了 500 kV 同塔双回架空输电线路仿真模型;计算分析了线路长度、输送功率、运行电压和土壤电阻率对感应电压和感应电流的影响;最后,利用混合差分进化-粒子群优化算法对上述影响因素与感应电压和感应电流进行多变量拟合。结果表明:线路长度对电磁感应电压、静电感应电流和电磁感应电流影响较大;输送功率对电磁感应电压和电磁感应电流影响较为显著;运行电压对静电感应电压、电磁感应电压、静电感应电流和电磁感应电流均有影响,几乎均成正比关系;土壤电阻率对电磁感应电压和电磁感应电流有一定影响。通过多元拟合分析,建立了上述影响因素与感应电压和感应电流的函数关系,为后续工程中感应电压、感应电流的估算提供了参考。

**关键词:**同塔双回;感应电压;感应电流;多元拟合

中图分类号:TM 723 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)03-0041-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220307

## Modeling and Analysis of Induced Voltage and Induced Current of 500 kV Double-circuit Transmission Lines on the Same Tower

TANG Haolong, FAN Yan, FENG Qianxiu, MOU Tingting

(CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

**Abstract:** When one circuit of transmission line operates and the other circuit of transmission line stops, large induced voltage and induced current may be generated on the shutdown line, which has certain potential safety hazards for operators and equipment. In order to study the induced voltage and induced current under different operating conditions, a simulation model of 500 kV double-circuit overhead transmission line on the same tower is established by using ATP-EMPT software. Then, the effects of line length, transmission power, operating voltage and soil resistivity on induced voltage and induced current are calculated and analyzed by the model. Finally, the hybrid differential evolution-particle swarm optimization algorithm is used to fit the formula of induced voltage and induced current. The results show that: the line length has a great influence on the electromagnetic induced voltage, electrostatic induced current and electromagnetic induced current. The transmission power has a significant effect on electromagnetic induced voltage and electromagnetic induced current. The operating voltage has an effect on the induced voltage and induced current, almost in direct proportion. Soil resistivity has a certain effect on electromagnetic induced voltage and electromagnetic induced current. Through multi-variable fitting analysis, the functional relationship between the above influencing factors and induced voltage and induced current is obtained, which provides a reference for the estimation of induced voltage and current in subsequent projects.

**Key words:** double-circuit transmission lines on the same tower; induced voltage; induced current; multi-variable fitting

## 0 引言

随着中国电力行业的迅猛发展,超高压、特高压

输变电工程不断增多,众多变电站、换流站之间的输电线路分布也越来越密集。为了解决输电线路通道走廊受限问题,节省工程总投资,同塔双架设的输电

线路形式成为了目前的主流趋势。线路同塔双回架设经济方便,优势明显,但也为后期线路的检修、维护工作带来了新的难题。

由于采用同塔双回结构,导致两回线路之间的相间距离大幅减小,使得耦合线路作用进一步加强。当其中一回线路运行而另一回线路需要停电检修时,正常运行的线路会在停运线路上感应出较大的电压和电流,给检修人员和运行设备带来安全隐患。文献[1]研究了 110 kV 同塔双回线路感应电压和感应电流对人体的危害。文献[2-3]研究了不同电压等级输电线路同塔架设时各回路之间感应电压和感应电流的变化规律,并对线路接地开关参数的选择提出了要求。文献[4-5]对某 330 kV 和 500 kV 同塔双回输电线路下平行运行的 380 V 线路进行了感应电压、感应电流的仿真计算,推荐了检修作业方式。文献[6]仿真计算了 $\pm 800$  kV、 $\pm 500$  kV 直流线路运行时,在邻近直流线路的 1000 kV 特高压同塔双回线路上产生的感应电压。关于同塔双回输电线路感应电压、感应电流的研究目前已较多,但对其影响因素的多变量拟合和感应电压、感应电流简易估算的研究却鲜有报道。

为了准确分析同塔双回输电线路感应电压、感应电流的变化规律和影响因素,下面利用电磁暂态仿真软件 ATP-EMPT 建立了 500 kV 同塔双回架空输电线路仿真模型,计算分析了线路长度、输送功率、运行电压和土壤电阻率对感应电压和感应电流的影响,并利用混合差分进化-粒子群优化算法对上述影响因素进行拟合,给出了感应电压、感应电流的多元拟合公式。

## 1 感应电压和感应电流理论分析

同塔双回输电线路当一回线路正常运行、另一回线路停运时,停运线路上会产生静电耦合和电磁耦合作用<sup>[7]</sup>,两条线路间的耦合如图 1 所示。其中, $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ 为正常运行线路的三相电压; $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 为正常运行线路的三相电流; $C_{Aa}$ 、 $C_{Ba}$ 、 $C_{Ca}$ 和  $M_{Aa}$ 、 $M_{Ba}$ 、 $M_{Ca}$ 分别为正常运行线路 A、B、C 三相与停运线路 a 相间的单位长度互电容和互电感; $C_{a0}$ 和  $M_{a0}$ 分别为停运线路 a 相单位长度对地电容和对地电感; $L$ 为线路长度。

对停运线路 a 相任意位置列出感应电压、感应

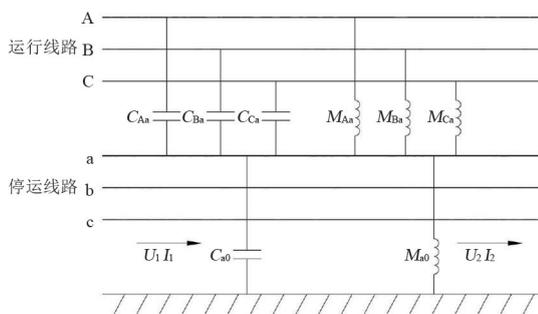


图 1 同塔双回线路耦合

电流计算方程为:

$$-\frac{\partial U}{\partial L} = j\omega M_{a0} I + j\omega M_{Aa} I_A + j\omega M_{Ba} I_B + j\omega M_{Ca} I_C \quad (1)$$

$$-\frac{\partial I}{\partial L} = j\omega C_{a0} U + j\omega C_{Aa} (U - U_A) + j\omega C_{Ba} (U - U_B) + j\omega C_{Ca} (U - U_C) \quad (2)$$

由于正常运行线路三相电压电流相角差为  $120^\circ$ ,代入式(1)和式(2)得:

$$U_2 = U_1 \cos(\gamma L) - jI_1 Z_c \sin(\gamma L) + (\alpha/\gamma^2) U_A [1 - \cos(\gamma L)] - j(M/M_{a0}) Z_c I_A \sin(\gamma L) \quad (3)$$

$$I_2 = -j(U_1/Z_c) \sin(\gamma L) + I_1 \cos(\gamma L) + j(\alpha/\gamma^2 Z_c) U_A \sin(\gamma L) + (M/M_{a0}) I_A [\cos(\gamma L) - 1] \quad (4)$$

其中:

$$\gamma = j\omega \sqrt{M_{a0}(C_{a0} + C_{Aa} + C_{Ba} + C_{Ca})} \quad (5)$$

$$\alpha = -\omega^2 M_{a0} [C_{Aa} + (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})C_{Ba} + (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})C_{Ca}] \quad (6)$$

$$Z_c = \sqrt{M_{a0}(C_{a0} + C_{Aa} + C_{Ba} + C_{Ca})} \quad (7)$$

$$M = M_{Aa} - (\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})M_{Ba} - (\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})M_{Ca} \quad (8)$$

式中: $U_1$ 、 $I_1$ 为停运线路首端电压、电流; $U_2$ 、 $I_2$ 为停运线路末端电压、电流; $\gamma$ 为线路的传输参数; $\alpha$ 为等效电容; $M$ 为等效电感; $Z_c$ 为波阻抗。

1)当停运线路两端均不接地时,停运线路中感应电流  $I_1 = I_2 \approx 0$ 。且对于一般线路,有  $\gamma L \ll 1$ ,则有

$$U_1 = U_2 \approx (\frac{\alpha}{\gamma^2}) U_A = \frac{C_{Aa} U_A + C_{Ba} U_B + C_{Ca} U_C}{C_{a0} + C_{Aa} + C_{Ba} + C_{Ca}} \quad (9)$$

2) 当停运线路一端接地、一端不接地时, 设末端接地, 即  $I_1=0, U_2=0$ , 则有

$$|U_1| \approx |j\omega L(M_{Aa}I_A + M_{Ba}I_B + M_{Ca}I_C)| \quad (10)$$

$$|I_2| \approx |j\omega L(C_{Aa}U_A + C_{Ba}U_B + C_{Ca}U_C)| \quad (11)$$

3) 当停运线路两端均接地时, 有  $U_1=0, U_2=0$ , 则

$$I_1 \approx I_2 \approx -(M_{Aa}I_A + M_{Ba}I_B + M_{Ca}I_C)/M_{a0} \quad (12)$$

## 2 仿真计算

### 2.1 计算模型

所研究的输电线路采用同塔双回结构, 研究基准参数设定如下: 线路长度为 60 km, 线路运行额定电压为 525 kV, 额定输送功率为 1000 MW, 导线规格型号为  $4 \times \text{JL/LB20A}-400/50$ , 分裂间距为 400 mm; 架空地线采用 JLB20A-120; 工频接地电阻取  $10 \Omega$ , 土壤电阻率取  $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。同塔双回杆塔结构如图 2 所示。

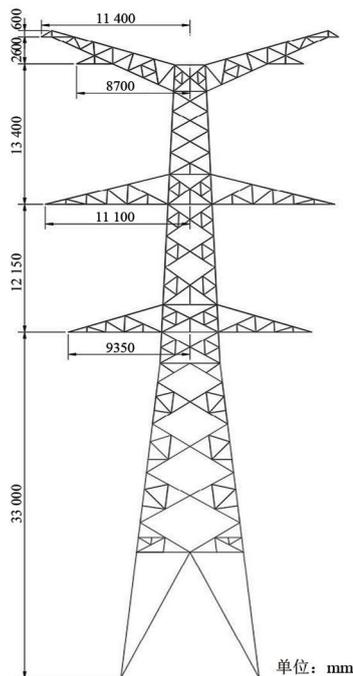


图 2 500 kV 同塔双回杆塔结构

利用电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 中的架空线路 LCC 模块建立同塔双回 PI 仿真模型, 该模型适用于长度不超过 300 km 的架空输电线路的计算<sup>[8]</sup>, 且系统运行参数、线路和杆塔参数均可采用详细参数<sup>[9]</sup>。

### 2.2 静电感应电压计算

当一回线路正常运行, 另一回线路停止运行,

且停运线路两端均不接地时, 设定运行线路输送功率为 1000 MW, 运行电压为 525 kV。通过上述仿真模型, 计算得到停运线路上产生的最大感应电压为 34.23 kV (幅值), 静电感应电压三相波形如图 3 所示。

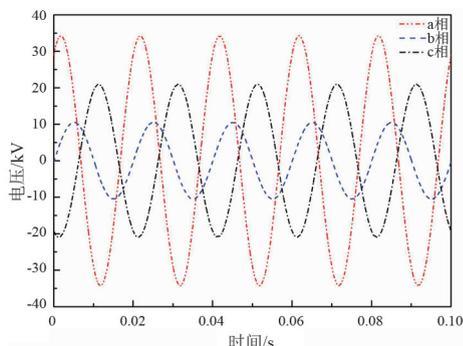


图 3 停运线路静电感应电压

### 2.3 电磁感应电压与静电感应电流计算

当一回线路正常运行, 另一回线路停止运行, 且停运线路一端接地、一端不接地时, 设定运行线路输送功率为 1000 MW, 运行电压为 525 kV。通过计算得到停运线路上产生的最大电磁感应电压为 9.44 kV (幅值), 最大静电感应电流为 8.08 A (幅值), 电磁感应电压与静电感应电流三相波形如图 4 和图 5 所示。

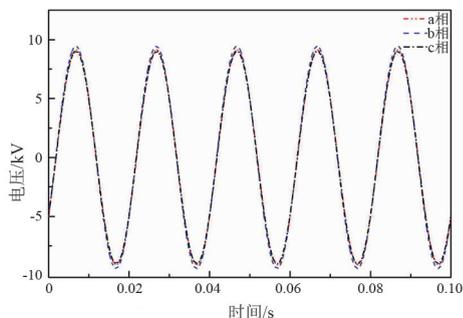


图 4 停运线路电磁感应电压

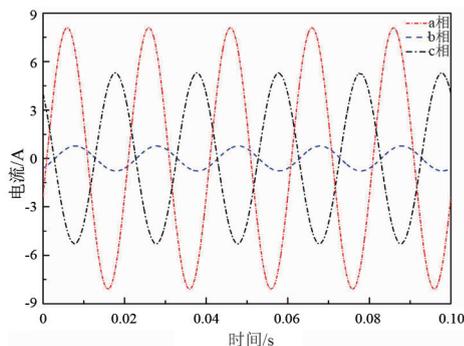


图 5 停运线路静电感应电流

### 2.4 电磁感应电流计算

当一回线路正常运行, 另一回线路停止运行, 且停运线路两端均接地时, 设定运行线路输送功

率为 1000 MW, 运行电压为 525 kV。通过上述仿真模型, 计算得到停运线路上产生的最大电磁感应电流为 288.42 A (幅值), 电磁感应电流三相波形如图 6 所示。

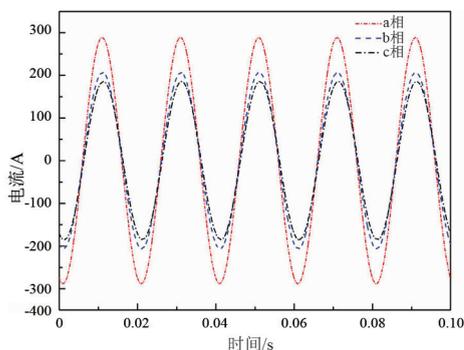


图 6 停运线路电磁感应电流

### 3 感应电压和感应电流影响因素分析

为了研究不同运行工况下感应电压与感应电流的大小, 以停运线路 a 相为例, 分别以线路长度、输送功率、运行电压和土壤电阻率为控制变量进行分析。设定基准线路长度为 60 km, 输送功率为 1000 MW, 运行电压为 525 kV, 土壤电阻率为  $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。对某一影响因素进行分析时, 保持其他影响因素参数一致。

#### 3.1 线路长度

为了研究线路长度对感应电压和感应电流的影响, 保持其他参数不变, 设定线路长度分别为 20 km、40 km、60 km、80 km 和 100 km, 利用仿真模型对感应电压和感应电流进行计算, 结果如图 7 所示。由图 7 可知, 线路长度对静电感应电压影响较小; 电磁感应电压和静电感应电流随线路长度的增加而增大, 近似成正比关系; 电磁感应电流随线路长度增加而变小, 但逐渐趋于平缓。

#### 3.2 输送功率

为了研究输送功率对感应电压和感应电流的影响, 保持其他参数不变, 设定输送功率分别为 500 MW、1000 MW、1500 MW、2000 MW 和 2500 MW, 利用仿真模型对感应电压和感应电流进行计算, 结果如图 8 所示。由图 8 可知, 静电感应电压和静电感应电流随输送功率的增加而增大, 但二者整体变化幅度均较小; 电磁感应电压和电磁感应电流随输送功率的增加而显著增大, 近似成正比关系。

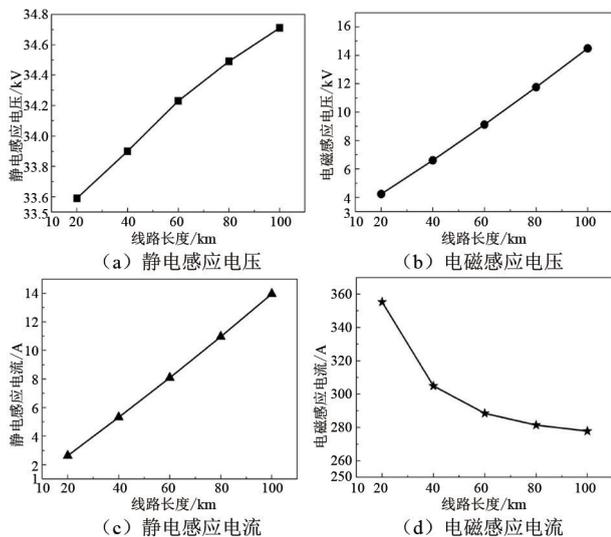


图 7 线路长度对感应电压和感应电流的影响

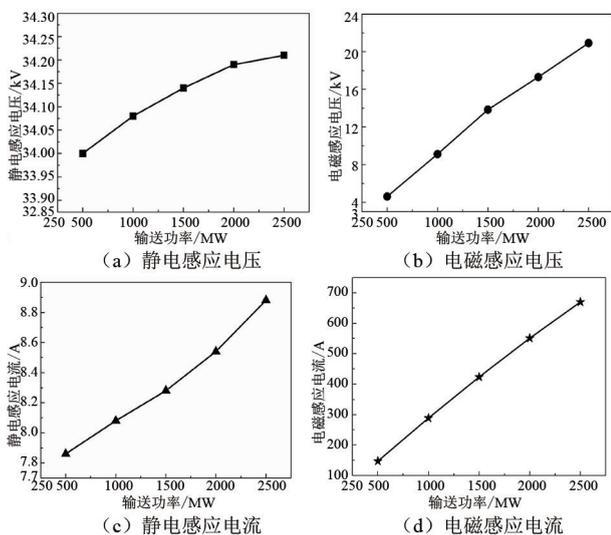


图 8 输送功率对感应电压和感应电流的影响

#### 3.3 运行电压

为了研究运行电压对感应电压和感应电流的影响, 保持其他参数不变, 设定运行电压分别为 505 kV、515 kV、525 kV、535 kV 和 545 kV, 利用仿真模型对感应电压和感应电流进行计算, 结果如图 9 所示。由图 9 可知, 静电感应电压、电磁感应电压、静电感应电流和电磁感应电流均随运行电压的增加而增大, 4 项均近似成正比关系。

#### 3.4 土壤电阻率

为了研究土壤电阻率对感应电压和感应电流的影响, 保持其他参数不变, 设定土壤电阻率分别为  $10 \Omega \cdot \text{m}$ 、 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 、 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 、 $200 \Omega \cdot \text{m}$  和  $500 \Omega \cdot \text{m}$ , 利用仿真模型对感应电压和感应电流进行计算, 结果如图 10 所示。由图 10 可知, 静电感应电压随土

壤电阻率的增加而减小,静电感应电流随土壤电阻率的增加而增大,但二者变化极小;电磁感应电压和电磁感应电流随土壤电阻率的增加而增大。

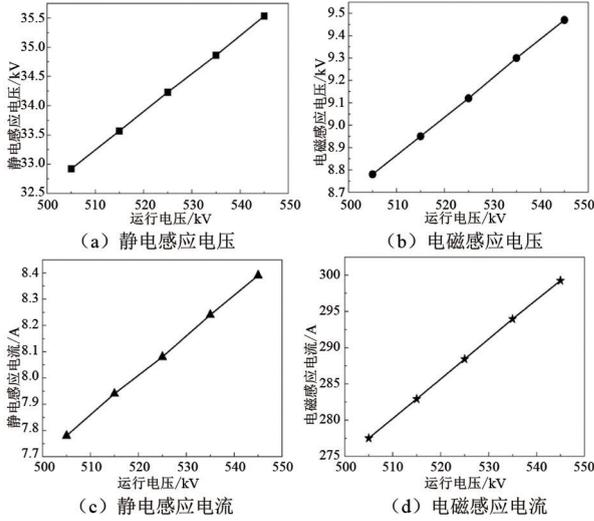


图 9 运行电压对感应电压和感应电流的影响

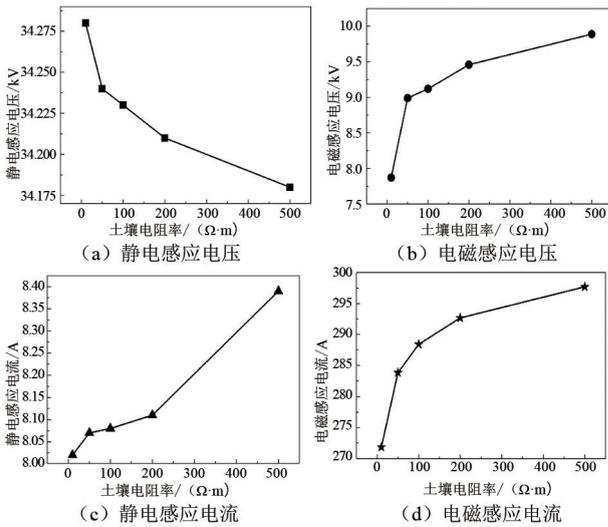


图 10 土壤电阻率对感应电压和感应电流的影响

### 4 感应电压和感应电流多元拟合分析

根据前面可知,同塔双回输电线路一回运行、一回停运时,停运线路上感应电压和感应电流与线路长度、输送功率、运行电压和土壤电阻率都有一定的关系。为了明确该多变量对应关系,利用混合差分进化-粒子群优化算法对其进行拟合,该算法通过使用粒子群优化算法来加快收敛速度,并使用差分进化算法来增加种群的多样性,可以较好地得到全局最优解,实现较优拟合。

根据前面仿真数据,首先对各单变量进行初步拟合,以此确定最优的函数结构。假设静电感应电

压为  $U_s$ ,电磁感应电压为  $U_m$ ,静电感应电流为  $I_s$ ,电磁感应电压为  $I_m$ ,线路长度为  $L$ ,输送功率为  $P$ ,运行电压为  $U$ ,土壤电阻率为  $\lambda$ 。经拟合分析,多变量函数具体可描述如下:

$$\begin{aligned}
 U_s &= a_0 + a_1 L + a_2 \ln P + a_3 U + a_4 \ln \lambda \\
 U_m &= b_0 + b_1 L + b_2 P + b_3 U + b_4 \ln \lambda \\
 I_s &= c_0 + c_1 L + c_2 P + c_3 U + c_4 \ln \lambda \\
 I_m &= d_0 + d_1 \ln L + d_2 P + d_3 U + d_4 \ln \lambda
 \end{aligned} \tag{13}$$

式中,  $a_0 \sim a_4, b_0 \sim b_4, c_0 \sim c_4$  和  $d_0 \sim d_4$  为待求参数。

利用 Matlab 软件,基于混合差分进化-粒子群优化算法确定上述各值,计算结果如表 1 所示。

表 1 待求参数结果

静电感应电压 $U_s$ /kV	电磁感应电压 $U_m$ /kV
$a_0$	$b_0$
$a_1$	$b_1$
$a_2$	$b_2$
$a_3$	$b_3$
$a_4$	$b_4$
静电感应电流 $I_s$ /A	电磁感应电流 $I_m$ /A
$c_0$	$d_0$
$c_1$	$d_1$
$c_2$	$d_2$
$c_3$	$d_3$
$c_4$	$d_4$

为了验证拟合公式的准确性,选取相同工况下的仿真输入数据代入拟合式(13)进行计算,并将计算结果与仿真结果进行对比,结果见表 2。

表 2 仿真结果与拟合结果对比

对比项	仿真结果	计算结果	相对误差/%
静电感应电压 $U_s$ /kV	33.90	33.914	-0.041
	34.08	34.188	-0.317
	33.57	33.537	0.098
	34.24	34.207	0.096
电磁感应电压 $U_m$ /kV	6.61	6.570	0.605
	9.12	9.130	-0.110
	8.95	8.957	-0.078
	8.99	8.780	2.336
静电感应电流 $I_s$ /A	5.32	5.290	0.564
	8.08	8.110	-0.371
	7.94	7.958	-0.227
	8.07	8.055	0.186
电磁感应电流 $I_m$ /A	304.89	310.012	-1.680
	288.47	289.457	-0.342
	282.92	284.007	-0.384
	283.86	284.780	-0.324

# 基于增量维纳反卷积的暂态过电压波形还原算法

郑鑫<sup>1</sup>,董乘甫<sup>2</sup>

(1.重庆高速工程顾问有限公司,重庆 401147;2.维谛技术创新中心(西安)有限公司,陕西 西安 710000)

**摘要:**在接触式过电压传感器的设计中,由于线路内分布参数的影响,测量系统的有效带宽受到限制。针对于此,文中对反卷积信号还原算法进行了研究,在传统的增量维纳反卷积算法上做出了改进,提出了一种预估 $\gamma$ 值的改进算法,并借助套管末屏分压测量系统进行了试验测试。结果表明,该算法通过对传感器输出波形处理,可修复测量结果中失真的高频成分,以准确获得原始的输入电压波形,进一步拓展了测量系统的测量带宽。

**关键词:**反卷积算法;维纳滤波器;频率响应

中图分类号:TM 711 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)03-0046-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220308

## Transient Overvoltage Waveform Restoration Algorithm Based on Incremental Wiener Deconvolution

ZHENG Xin<sup>1</sup>, DONG Chengfu<sup>2</sup>

(1.Chongqing Expressway Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 401147, China;  
2.Vertiv Technology Innovation Center (Xi'an) Co., Ltd., Xi'an 710000, Shaanxi, China)

**Abstract:**In the design of contact overvoltage sensor, the effective bandwidth of measurement system is limited due to the influence of distributed parameters in the line. In view of this, the deconvolution signal restoration algorithm is studied, the traditional incremental Wiener deconvolution algorithm is improved, and an improvement algorithm for  $\gamma$  prediction is proposed. With the help of partial pressure measurement system at the end of casing screen, the test is carried out. The results show that the proposed algorithm can repair the distorted high-frequency components in the measurement results by processing the output waveform of the sensor, so as to obtain the original input voltage waveform accurately and further expand the measurement bandwidth of the measurement system.

**Key words:** deconvolution algorithm; Wiener filter; frequency response

## 0 引言

在以往过电压检测系统的研究中,常见的测量系统通常是利用分压器来获取过电压信号。对于此类接触式过电压传感器,其与电力系统中一次设备相连接的特点,往往令分压器本身结构简单、设计方便。但线路中的分布参数和系统内设备自身特性,往往会令测量系统的测量带宽受到限制。在测量操作过电压及雷电冲击电压时,其高频响应较差,分压系统测量结果存在畸变。

为解决数字化冲击测量系统的测量误差,反卷积的方法被应用于对测量数据的处理中<sup>[1-5]</sup>。文献[6]根据时域递归卷积与矢量匹配法相结合的方法对电压互感器测量结果进行处理,还原了高压端的原始波形。文献[7]在套管末屏分压测量系统中,应用增量维纳反卷积方法实现了对波形的还原,验证了系统对快速暂态过电压的测量可行性。文献[8]基于传统的增量维纳反卷积算法,结合离散 Gabor 变换展开去噪方法,提出了一种波形重构算法,并应用仿真进行了验证。

下面设计了一种波形还原算法,并在传统增量

维纳反卷积方法的基础上,提出了一种预估 $\gamma$ 值的改进算法。通过110 kV电容式套管分压试验平台进行验证,改进后的反卷积算法可准确地还原输入的原始信号。相比传统的增量维纳反卷积算法,改进后的算法减小了计算量,增加了实用性。

## 1 波形还原算法设计

### 1.1 过电压测量畸变的原因

在电力系统中,对于过电压检测系统所获取的输出信号,其成分不仅包含了过电压本身的信息和特性,同时也反映了测量系统的特性。如在基于电容型套管所组成的测量系统中,由于高压臂由套管内部导杆到末屏的等效电容和末端阻尼共同组成,所以套管自身的电容性能同样会影响着最终的测量结果。而基于电容式套管自身复杂的结构特点,使得电容式套管可等效为一个含有电位悬浮导体的电极系统,其电路模型为一个电阻、电容、电感构成的复杂网络<sup>[7]</sup>,其各极板等效单元电路模型如图1所示。

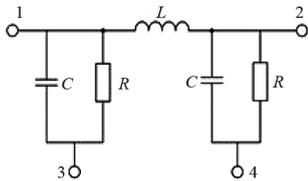


图1 极板等效单元电路模型

通过对该网络的分析可知,电容式套管自身的谐振频率较低,因此传感器的高频响应极易受到影响。这种畸变体现在套管自身电容特性、传感器性能与传输路径杂散参数等方面。所以,在实际的测量中,测量系统往往由于此类原因,无法达到理想的特性,从而导致测量信号会产生一定的畸变。

### 1.2 反卷积原理

波形还原算法的核心在于应用反卷积的方法,对传感器的输出信号进行处理,来反演系统输入端的原始波形。因此,首先需要明确反卷积还原的原理<sup>[9-12]</sup>。

对于线性时不变系统,这种传输过程可表为

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t-\tau)x(\tau) d\tau \quad (1)$$

式中: $y(t)$ 为系统得到的输出信号; $h(t-\tau)$ 为测量系统在 $\tau$ 时刻的冲激响应; $x(\tau)$ 为 $\tau$ 时刻的原始输入

信号。转换到频域分析中,式(1)可表示为

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) \quad (2)$$

式中, $Y(\omega)$ 、 $H(\omega)$ 和 $X(\omega)$ 分别为 $y(t)$ 、 $h(t)$ 和 $x(t)$ 进行傅里叶变换,转换到频域中的形式。在过电压测量系统的应用上,反卷积的目的是为了还原失真的高频信号,拓展测量带宽,还原后的结果可表示为

$$X(\omega) = \frac{Y(\omega)}{H(\omega)} \quad (3)$$

式中的 $X(\omega)$ 经过傅里叶逆变换,即可获得输入端的原始信号 $x(t)$ 。

值得注意的是,由于上述理想分析过程中完全忽略了噪声信号的影响,因此可以完全复原输入信号。但是在实际过程中,噪声信号 $e(t)$ 无法避免,此时信号传输过程如式(4)所示。

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t-\tau)x(\tau) d\tau + e(t) \quad (4)$$

对该式进行频域转换可得

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) + E(\omega) \quad (5)$$

式中, $E(\omega)$ 为 $e(t)$ 的傅里叶变换形式。根据式(3),在考虑噪声信号的影响下,还原过程实际应为

$$X(\omega) = \frac{Y(\omega) - E(\omega)}{H(\omega)} \quad (6)$$

对于实际的信号处理应用,由于无法准确地获取噪声信号,同时 $|H(\omega)|$ 在高频信号的处理中趋近于0,因此会导致算法对高频噪声信号极其敏感,从而造成较大的误差,这种影响也被称为反卷积的病态性问题。针对这一问题,通常可通过降噪和重构卷积模型两种方式来减轻。

### 1.3 基于维纳滤波器的卷积模型

对于反卷积复原算法中卷积模型的构建,通常可应用维纳滤波器来实现。维纳滤波器由N Wiener首次提出,该方法是一种基于最小均方误差准则下的最佳线性滤波方法,其对信号的处理过程如图2所示<sup>[13-14]</sup>。



图2 基于维纳滤波器的信号处理过程

为构建维纳滤波器,可通过测量系统的方波响应结果,应用最小二乘法的思想,对传感器测量系统的频域响应特性 $H(\omega)$ 进行估计<sup>[15-18]</sup>。

对获取  $\hat{H}$  进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT), 按照维纳滤波原理, 可构建反卷积还原所需滤波器为

$$W = \frac{H^*(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \gamma} \quad (7)$$

式中,  $\gamma$  为输出结果中的噪声功率谱  $S_e(\omega)$  与信号功率谱  $S_y(\omega)$  所决定的一个常数。

$$\gamma = \frac{S_e(\omega)}{S_y(\omega)} \quad (8)$$

该系数  $\gamma > 0$ , 并且其取值将决定实际信号还原的效果。因此, 初步得到还原信号的估计表示为

$$\hat{X}_0(\omega) = \frac{H^*(\omega)Y(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \gamma} \quad (9)$$

为进一步减小估计误差, 采用增量维纳滤波器对上述的估计结果继续进行处理。这种方法在传统的维纳反卷积算法中引入了约束条件, 允许进行迭代估计。设维纳反卷积的误差为  $E_{old}(\omega)$ 。

$$E_{old}(\omega) = Y(\omega) - X_0(\omega)H(\omega) \quad (10)$$

将此误差结果继续代入到滤波器输入中, 则此时滤波器得到的新估计结果为

$$X_1(\omega) = X_0(\omega) + \frac{H^*(\omega)E_{old}(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \gamma} \quad (11)$$

因此, 该结果对应的反卷积误差为

$$E_{new}(\omega) = Y(\omega) - X_1(\omega)H(\omega) \quad (12)$$

根据式(10)、式(11)和式(12), 可以得

$$E_{new}(\omega) = \frac{\gamma}{|H(\omega)|^2 + \gamma} E_{old}(\omega) \quad (13)$$

由于  $\gamma > 0$ , 并且  $|H(\omega)| \geq 0$ , 所以有

$$|E_{new}|^2 \leq |E_{old}|^2 \quad (14)$$

但需要注意的是, 由于输出信号的信噪比是难以时刻准确获取的, 该算法中的  $\gamma$  是一个人为输入的预设值。因此需考虑  $\gamma$  的初始取值对反卷积还原结果的影响。选取多组不同的  $\gamma$  值, 分别进行信号还原, 各还原结果如图 3 所示。

观察图中不同  $\gamma$  值下的波形还原结果, 通过对比可知:

1) 在  $\gamma$  值大于实际值时, 虽然还原算法消除了原分压信号中的畸变, 但还原信号与原始信号之间的误差较大, 此时并没有反卷积的病态问题;

2) 随着  $\gamma$  值的减小, 还原信号与原始信号间的误差减小, 波形逐渐一致;

3) 当  $\gamma$  值进一步减小, 且远小于由噪声功率谱

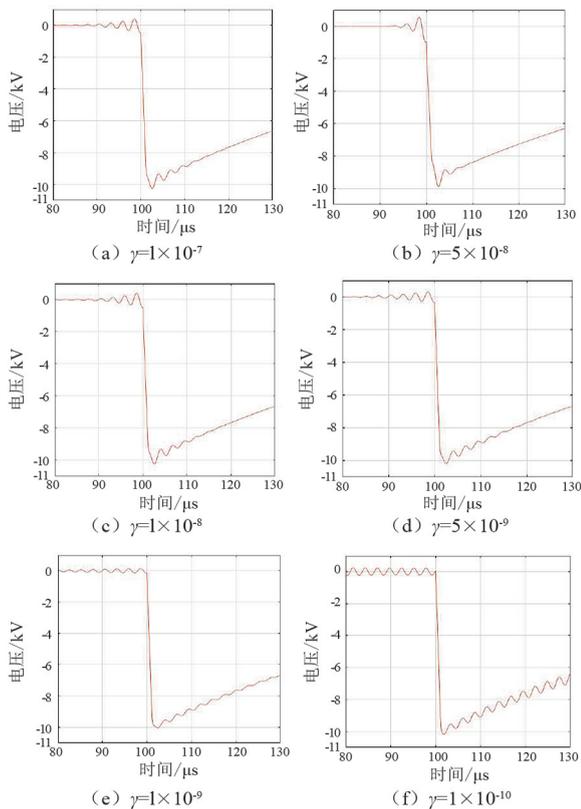


图 3 不同  $\gamma$  值下的增量维纳反卷积波形还原结果

所计算的实际值时, 还原信号的波形与源输入信号依然相近, 然而反卷积的病态问题也随之可见, 并逐渐严重。

综上所述, 人为预估的  $\gamma$  值对还原结果有着显著影响, 且极易令还原结果产生误差。

#### 1.4 改进的增量维纳反卷积算法

针对  $\gamma$  值的取值问题, 提出了一种改进的增量维纳反卷积算法。

首先, 应用基础的增量维纳反卷积算法处理原输出信号, 可得到初步恢复的还原结果  $X_{old}(\omega)$ 。对于原始的维纳反卷积算法, 该结果仅为单次反卷积结果, 而增量维纳反卷积可引入迭代计算, 进一步减小误差到人为控制范围内。其次, 可在此基础上, 进一步计算还原结果  $X_{old}(\omega)$  的卷积和原输出信号之间的误差  $E_{old}(\omega)$  为

$$E_{old}(\omega) = Y(\omega) - X_{old}(\omega)H(\omega) \quad (15)$$

利用计算得到的  $E_{old}(\omega)$  与初步还原结果  $X_{old}(\omega)$ , 可估计下一次计算中  $\gamma$  的取值, 以此重新构建维纳滤波器为

$$W_{new} = \frac{H^*(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \frac{|E_{old}(\omega)|}{|X_{old}(\omega)|} s} \quad (16)$$

式中,  $s$  为一正常数, 可令  $s = \sqrt{\gamma}$ 。将改进后的维纳滤波器  $W_{\text{new}}$  代入下一次的卷积运算当中, 即可得到新的还原结果  $X_{\text{new}}(\omega)$  为

$$X_{\text{new}}(\omega) = X_{\text{old}}(\omega) + \frac{H^*(\omega)E_{\text{old}}(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \frac{|E_{\text{old}}(\omega)|}{|X_{\text{old}}(\omega)|}s} \quad (17)$$

新的还原结果对应的反卷积误差为

$$E_{\text{new}}(\omega) = Y(\omega) - X_{\text{new}}(\omega)H(\omega) \quad (18)$$

根据式(16)、式(17)和式(18), 可以得

$$E_{\text{new}}(\omega) = \frac{|E_{\text{old}}(\omega)|s}{|X_{\text{old}}(\omega)| |H(\omega)|^2 + |E_{\text{old}}(\omega)|s} E_{\text{old}}(\omega) \quad (19)$$

由式(19)可知, 改进后的反卷积算法同样满足:

$$|E_{\text{new}}|^2 \leq |E_{\text{old}}|^2 \quad (20)$$

值得注意的是, 尽管在迭代运算中利用还原结果与误差值对  $\gamma$  的取值进行了估计, 但在初次的反卷积计算中, 仍然需要人为地预设一个  $\gamma$  初值。实际应用中, 通过如前述所采用的递归最小二乘 (recursive least squares, RLS) 自适应滤波器降噪处理后, 该参数值可控制在小于  $10^{-5}$  范围以内。

综上所述, 改进后的反卷积算法步骤依次如下:

- 1) 预设  $\gamma$  值, 运用传统维纳反卷积算法处理传感器输出信号, 得到初次还原结果;
- 2) 利用初次还原结果, 可对  $\gamma$  值重新进行估计;
- 3) 重新构建维纳滤波器, 采用增量维纳反卷积算法处理初次还原结果;
- 4) 分析此次的还原结果与原信号的误差是否达到要求, 若达到则终止运算, 否则回到步骤 2 继续运算。

改进后维纳反卷积算法流程如图 4 所示。

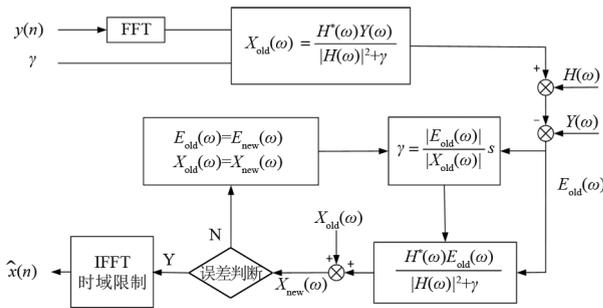


图 4 改进的维纳反卷积算法流程

## 2 仿真测试

应用仿真实验对改进的增量维纳反卷积算法进

行验证, 所做仿真试验是对套管末屏分压器的测量进行了模拟, 电路参数按照套管末屏分压系统的现场试验情况进行选取。仿真中输入的冲击电压波形与传感器输出的波形如图 5 所示。

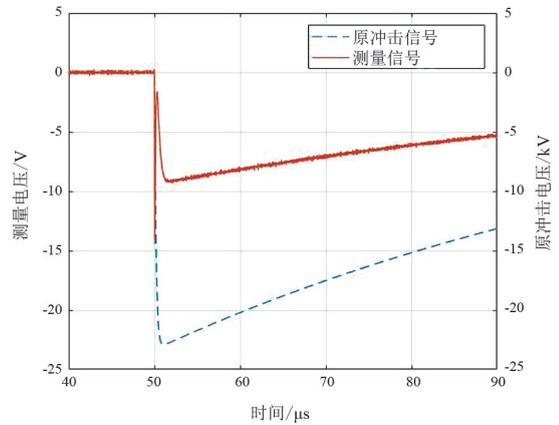


图 5 原始冲击输入和传感器输出波形

仿真试验模拟了实际中的常规问题。从结果上分析, 由于增大了仿真电路中的杂散电感参数, 传感器端输出的电压波形在波头处存在很大的畸变, 导致测量结果与输入波形不符, 测量效果不理想。同时, 传感器输出的电压信号中混杂了较大的噪声分量。经过计算, 输出结果的信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 为 26.4 dB。若信号传输过程中掺杂了此程度的噪声分量, 反卷积运算将会产生较为严重的病态问题, 如图 6 所示。

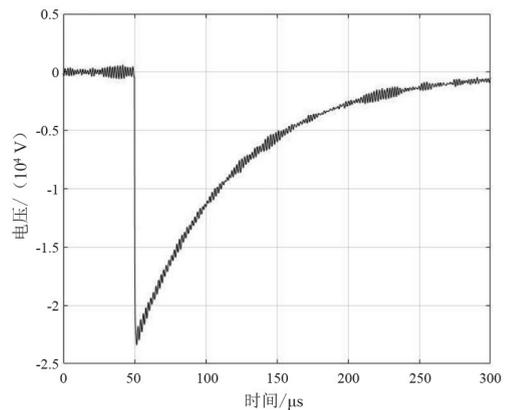


图 6 降噪前的还原波形结果

未经降噪的情况下, 虽然已经能够还原原始波形的整体趋势, 但波形的病态问题仍然导致还原结果与真实输入存在较大的偏差。由此, 应用 RLS 自适应滤波算法对输出信号进行处理, 得到的降噪后结果如图 7 所示。

图 7 中结果表明, RLS 自适应滤波算法并未改变传感器本身的输出特性, 经处理后的波形 SNR

为 47.6 dB。对此,应用改进的增量维纳反卷积算法处理输出电压信号,并将还原结果波形与原始输入波形均做归一化处理,得到的还原信号波形和归一化对比如图 8 所示。

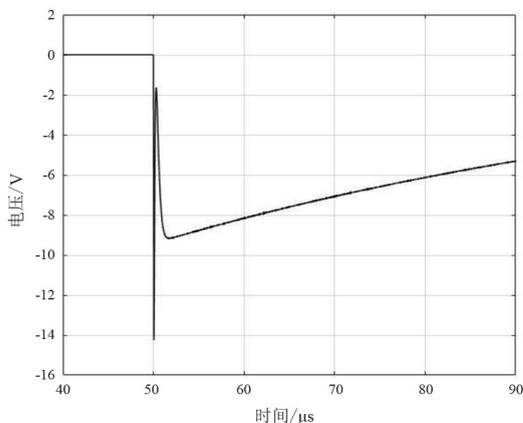


图 7 降噪后的输出电压波形

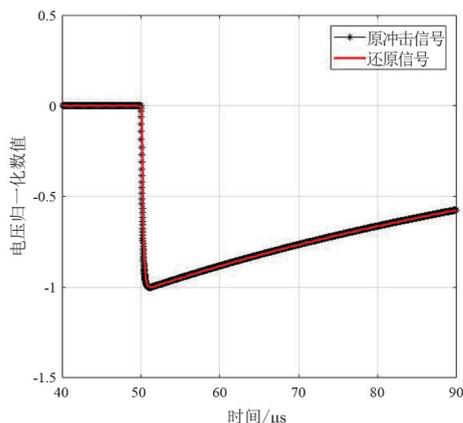


图 8 仿真验证还原结果归一化对比

从图 8 中结果可以看出,应用还原算法得到的还原波形不再有波头处的畸变,且其与原输入波形基本一致。经过计算,原输入信号与还原信号的波前时间误差不足  $0.1 \mu\text{s}$ ,且二者归一化波形间的均方误差  $e^2$  仅为  $9.44 \times 10^{-7}$ ,证明还原效果十分理想。

为验证改进后算法的优化程度,同时应用原增量维纳反卷积算法对传感器输出波形进行处理,得到两种反卷积方式在相同  $\gamma$  取值下运算的迭代次数,如表 1 所示。

表 1 两反卷积方式运算迭代次数

初始 $\gamma$ 值	增量维纳法迭代次数	改进维纳法迭代次数
$1 \times 10^{-4}$	1601	146
$1 \times 10^{-5}$	159	31
$1 \times 10^{-6}$	16	6
$1 \times 10^{-7}$	2	2

对比表 1 中数据可知,相比于传统的增量维纳反卷积算法,改进后的维纳反卷积算法可通过前次

的还原结果来估计  $\gamma$  取值,所以极大地减少了迭代计算次数,减小了计算量。

结合以上仿真试验和分析可知,改进后的反卷积算法能够实现对原始电压的准确还原。

### 3 试验测试

借助 110 kV 套管末屏分压试验平台,对套管末屏分压器的现场测量数据进行处理,进一步测试算法的实际应用效果<sup>[19]</sup>。测试的雷电冲击响应试验现场接线如图 9 所示。

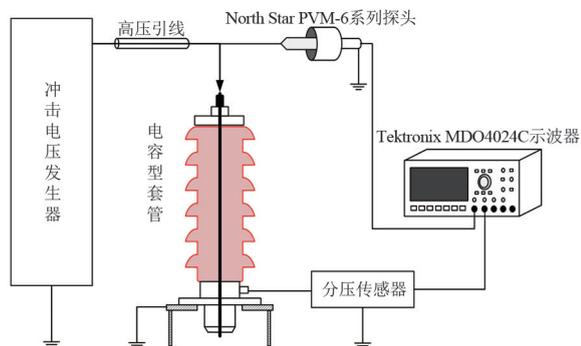
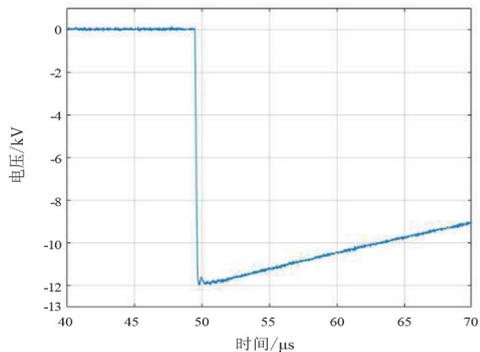
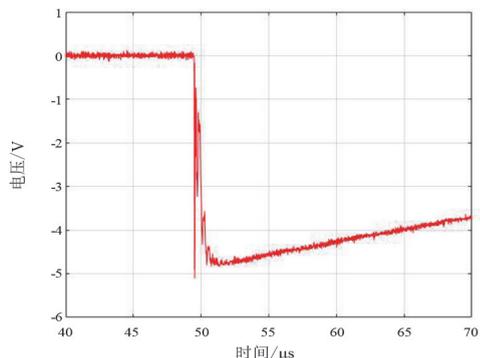


图 9 冲击试验接线

试验期间选取了一组畸变的分压波形,该结果如图 10 所示。



(a) 输入冲击电压波形

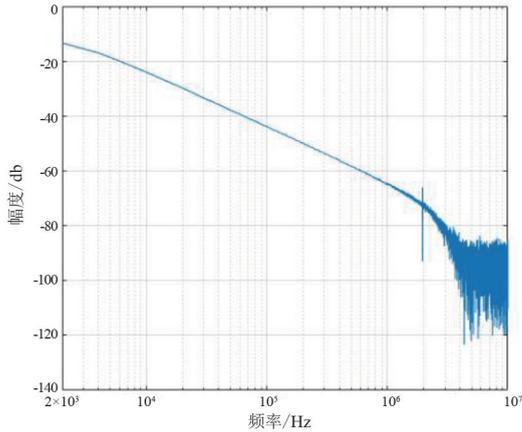


(b) 传感器端输出波形

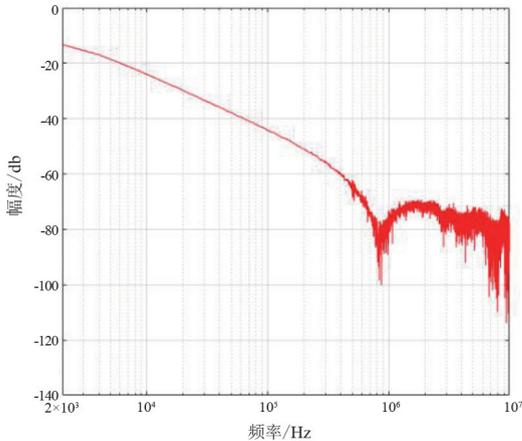
图 10 实验得到的畸变波形结果

在图 10 中,输入端的冲击电压信号为非标准雷电冲击电压,其波前时间为  $0.24 \mu\text{s}$ ,电压幅值为  $11.96 \text{ kV}$ ,极性为负。

传感器端输出电压信号在波头处存在严重震荡畸变,该现象可能由回路和传感器内部杂散参数以及不良的线路匹配方式等问题所造成。两波形归一化后的幅频特性如图 11 所示,对比两波形的幅频特性曲线,可以看出失真的传感器端输出波形无法完整反映源输入波形的真实情况。



(a) 源输入波形的幅频特性

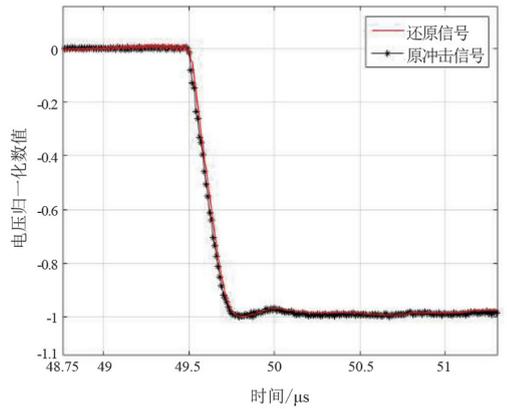


(b) 传感器输出信号的幅频特性

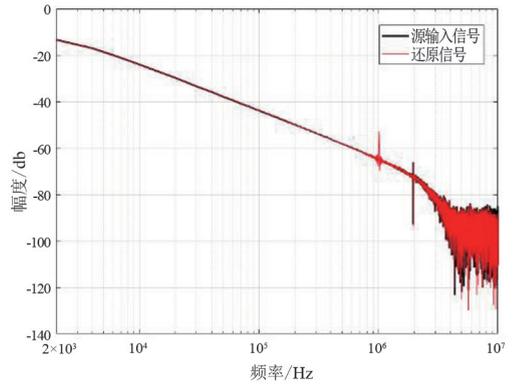
图 11 输入、输出波形的幅频特性

利用设计的波形还原算法,处理畸变的输出信号,得到的波形还原结果和源冲击波形的归一化对比以及二者的幅频特性对比如图 12 所示。

从图 12 (a) 可知,还原波形的波前时间为  $0.25 \mu\text{s}$ ,与源波形的波前时间误差仅为  $0.01 \mu\text{s}$ ,并且波形的波头处畸变得到了消除,其整体趋势同源波形基本一致。经过计算,还原波形与源输入波形的归一化均方误差为  $3.81 \times 10^{-5}$ ,证明还原算法的还原效果理想。同时,对比图 10(b) 与图 11(b) 中的频率谱,相比于传感器输出波形在频率  $1 \text{ MHz}$  以上

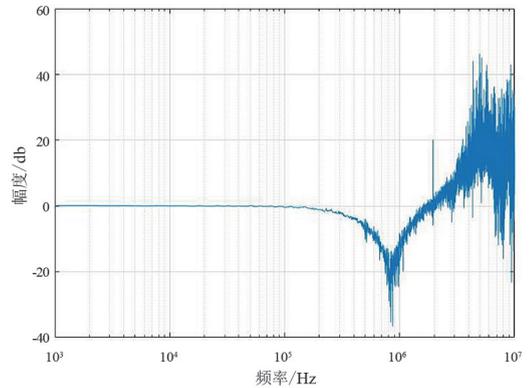


(a) 还原波形归一化对比图

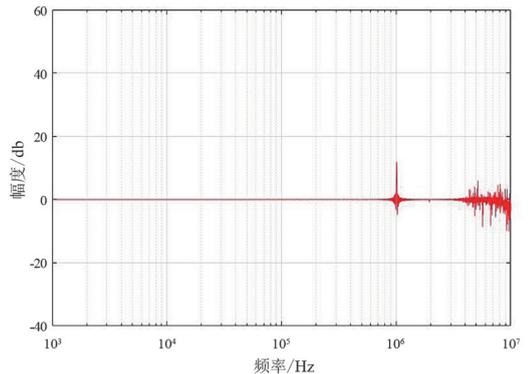


(b) 还原信号与源输入信号的幅频响应对比图

图 12 还原波形与源输入信号的对比



(a) 原测量系统的频率响应



(b) 应用还原算法后的系统频率响应

图 13 归一化后系统频率响应对比

的失真情况,还原波形准确地复原了源波形在高频段的各频率成分。

图 13 为原系统与应用还原算法后的频率响应对比图。

对系统的频率响应对比分析,图 13 结果显示,应用还原算法后,除个别谐振点外,测量系统的频率响应曲线在 10 MHz 以内无明显波动。相比于原测量系统在不足 1 MHz 即出现的信号畸变情况,波形还原算法有效地拓展了原测量系统的测量带宽。

## 4 结 论

基于维纳反卷积方法设计了一种波形还原算法,结合仿真与试验的分析,其主要结论如下:

1) 阐述了波形还原算法的设计目的,分析了测量系统自身内部特性引起波形失真的原因,维纳滤波器的构建方法和维纳反卷积算法运行原理;

2) 在分析了人为输入  $\gamma$  参数对还原结果产生的影响后,提出了一种新的  $\gamma$  参数预估方法,在原有的维纳反卷积算法上做出了优化改进;

3) 通过仿真和试验验证了算法还原原始波形的可行性,并同传统的维纳反卷积算法做出了对比分析,验证了改进后的算法拥有更好的实用性。

### 参考文献

- [1] 陈来军,黎立丰,郑天文,等.基于自适应滤波的并联逆变器谐振抑制策略[J].电网技术,2020,44(1):200-207.
- [2] 姜金美,胡蓉,赵全友.基于改进的维纳滤波图像复原算法的研究[J].大众科技,2020,22(1):1-4.
- [3] Qiancheng LIU, Yongming LU, Hui SUN, et al. Single-Step Data-Domain Least-Squares Reverse-Time Migration Using Gabor Deconvolution for Subsalt Imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(1): 13-16.
- [4] 柏宇,杨欣爽,许豪,等.自适应滤波器的原理与应用分析[J].中国新通信,2018,20(15):109.
- [5] 甄晓丹,郝凯学,李梅.基于伪随机序列的维纳滤波反卷积算法的改进[J].电子设计工程,2016,24(24):12-14.
- [6] 岳鹏.雷电过电压下的电压互感器反演计算建模方法研究[D].保定:华北电力大学,2010.
- [7] 马国明,李成榕,全江涛,等.采用套管传感器测量变压器线端快速暂态过电压的方法[J].中国电机工程学报,2010,30(33):122-128.
- [8] 贺苏赣,朱旭东.一种数字化冲击电压波形重构新算法[J].高电压技术,2006,32(10):19-21.
- [9] Ashish GUPTA, Chandupatla Chakradhar REDDY. Analytical Insights Into Parameter Estimation for Wiener Deconvolution[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(10): 2566-2575.
- [10] 饶显杰,周凯,谢敏,等.基于频域反射法的特征时域波形恢复技术[J].高电压技术,2021,47(4):1420-1427.
- [11] 韩永霞,冯帅松,高毓群,等.柔性直流配电系统过电流及过电压防护研究综述[J].广东电力,2020,33(12):81-89.
- [12] 叶海峰,吴昊,罗颖婷,等.计及暂态过电压累积效应的变压器换位导线绝缘特性[J].广东电力,2018,31(8):75-80.
- [13] 王平,张广勇,李慧奇,等.特高压电容分压器宽频无源等效电路建模方法[J].高压电器,2017,53(6):19-24.
- [14] 王飞,史建涛.一种基于自适应滤波的雷达目标跟踪算法[J].现代雷达,2019,41(10):35-38.
- [15] 栾孟杰.基于小波阈值法和 LMS 自适应滤波法的舰船去噪方法[J].舰船科学技术,2019,41(10):16-18.
- [16] 王允森,王勇,左晨,等.基于维纳滤波和综合评价因子的遥感图像复原[J].空间电子技术,2021,18(3):13-20.
- [17] 毕海胜,负智强,李慧瑶,等.基于盲目反卷积算法的声发射源信号复原研究进展[J].激光与光电子学进展,2021,58(6):73-83.
- [18] 王丹茜,徐青,邢帅,等.机载激光测深去卷积信号提取方法的比较[J].测绘学报,2018,47(2):161-169.
- [19] 江贤峰,吴龟灵,郭芳,等.高精度时间频率信号光纤传输和复原技术的研究[J].全球定位系统,2016,41(2):20-26.

### 作者简介:

郑鑫(1974),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为高速公路工程管理;

董秉甫(1996),男,硕士研究生,研究方向为基于变压器套管过电压监测技术。

(收稿日期:2022-01-20)

# 超高压交叉线路空间电磁环境分析

马明智,杨昌杰

(甘肃电通电力工程设计咨询有限公司,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**针对存在交叉跨越的超高压输电线路,采用有限元法研究交叉线路三维空间电磁环境,分析不同相序排列及不同交叉角对空间电磁环境的影响。对于规划中或已建成的输电线路,当目标区域出现环境电磁场超标时,引入混沌变参数粒子群算法搜索屏蔽效果最好的屏蔽线架设位置,从而实现目标区域的最优屏蔽。

**关键词:**超高压交叉线路;电磁环境;有限元法;混沌;粒子群算法

**中图分类号:**TM 723 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)03-0053-04

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220309

## Analysis of Space Electromagnetic Environment of EHV Crossing Transmission Lines

MA Mingzhi, YANG Changjie

(Gansu Diantong Electric Power Engineering Design and Consulting Co., Ltd.,  
Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** Aiming at extra-high voltage (EHV) transmission lines with crossing, three-dimensional space electromagnetic environment of EHV crossing lines is studied by finite element method, and the influence of different phase sequence arrangement and different crossing angles on the space electromagnetic environment is analyzed. For the transmission lines in plan or having been built, chaotic particle swarm optimization algorithm with variable parameters is introduced when electromagnetic environment exceeds the standard in the target area, and the optimal erecting position of shielding lines is searched to make the best shielding effect, thus, the optimal shielding of the target area is achieved.

**Key words:** EHV crossing lines; electromagnetic environment; finite element method; chaos; particle swarm optimization algorithm

## 0 引言

超高压输电线路产生的工频电磁污染引起了社会各方面关注,公众对电磁环境问题的关注已成为电网发展的主要制约因素之一。因此,超高压输电线路的电磁环境问题成为线路设计的重要控制因素。目前,国内对超/特高压输电线路电磁环境公众暴露限值控制标准为:工频电场限值 $4\text{ kV/m}$ ,工频磁场限值 $100\text{ }\mu\text{T}$ ,线下耕地、园地、牧草地、养殖水面等场所工频电场限值 $10\text{ kV/m}$ <sup>[1]</sup>。随着输电网的大量建设,超高压输电线路工程不可避免地与相对电压等级较低的输电线路产生交叉跨越,而交叉区域电

磁环境问题比较复杂,其计算需要建立三维模型。相对于二维场,三维空间的电磁环境计算尚未有成熟的解析方法。目前,电磁环境的计算,主要有应用于微分方程型数学模型的有限元法和应用于积分方程型数学模型的逐次镜像法、模拟电荷法、矩量法等<sup>[2-7]</sup>。

下面采用有限元法,依托实际工程建立模型,分析超高压交叉输电线路下方工频电磁场的特征,研究影响其强度的相序排列及交叉角等因素;采用屏蔽线降低电磁污染超标的交叉线路场强强度,并对屏蔽线架设位置采用混沌变参数粒子群算法(chaotic particle swarm optimization algorithm with variable parameters, CPSO)进行寻优<sup>[3]</sup>,为输电线路设计提供指导依据。

## 1 研究模型

架空输电线路空间工频电磁场受导线对地高度、相间距离、分裂导线结构尺寸、导线布置形式、架空地线以及周围环境等诸多因素影响。电力系统大多采用通用设计塔型,这里以同塔双回 750 kV 输电线路与单回 330 kV 输电线路交叉情况为研究对象,建立相应模型,分析线路电磁环境特征以及导线不同相序排列与线路交叉角对工频电磁环境的影响。

交叉输电线路空间布置及相序排列方式如图 1 所示。所研究模型为:上层 750 kV 线路采用双回路鼓型铁塔,导线每相为 6 分裂排列,相邻子导线分裂间距为 400 mm,导线采用 JL/G1A-400/50 钢芯铝绞线,地线采用 1×19-13.5-1270-B 镀锌钢绞线;下层 330 kV 线路采用单回路猫头、干字型铁塔,导线每相为双分裂水平排列,分裂间距 400 mm,导线采用 JL/G1A-300/40 钢芯铝绞线;组合相序排列方式共 6 种。图 1 中:A1—C1 表示 750 kV 同塔双回线路的 1 回导线,A2—C2 表示 2 回导线,D1、D2 分别为 1、2 回线路地线;A3—C3 表示 330 kV 导线,D3 为其地线。根据排列方式不同,上层 750 kV 可排出 I~VI 六种,下层 330 kV 可排出 1~6 六种。

在输电线路三维电磁环境计算中,采用有限元法,将空间网格剖分成许多细小四节点三棱锥(四面体)单元,空间场量的计算可表示为:

$$u_e(x, y, z) = \sum_{i=1}^L N_{ei} \cdot U_i \quad (1)$$

$$N_{ei} = \frac{1}{V_e} \sum_{i=1}^L (p_i + q_i \cdot x + r_i \cdot y + s_i \cdot z) \quad (2)$$

式中: $L$  为空间三棱锥划分数量; $U_i$  为第  $i$  个三棱锥

顶点场量; $N_{ei}$  为第  $i$  个三棱锥的插值基函数; $p_i$ 、 $q_i$ 、 $r_i$ 、 $s_i$ 、 $V_e$  为由三棱锥顶点坐标计算出的系数。

工程用麦克斯韦方程组微分型式可表示为:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (6)$$

引入矢量磁位,满足

$$B = \nabla \times A \quad (7)$$

相应有关场量的辅助方程为

$$D = \varepsilon E, B = \mu H, J = \sigma E \quad (8)$$

式(3)至式(8)中: $E$  为电场强度; $D$  为电位移; $B$  为磁通密度; $H$  为磁场强度; $\rho$  为电荷密度; $\varepsilon$  为介电常数; $\mu$  为磁导率; $\sigma$  为电导率; $J$  为电流密度; $t$  为时间。

以麦克斯韦微分方程组导出用于有限元处理电磁问题的微分方程,计算过程能考虑任意塔形和导线布置,准确计算空间任一点的电磁场强度数值解。

## 2 交叉线路电磁感应影响要因分析

为考察交叉线路三维电磁环境,在图 1 所示的空间模型中,以线路下方离地面 1.5 m 处某平面为考察区域,将目标区域划分成  $N \times N$  的小方形域,求取每个域的电磁场加权平均值,权重系数应反映每个小区域的重要程度。区域目标函数  $F$  可表示为

$$F = \sum_{j=1}^{N \times N} k_j \times E_j \quad (9)$$

式中: $E_j$  为第  $j$  个小方域电场强度或磁感应强度;

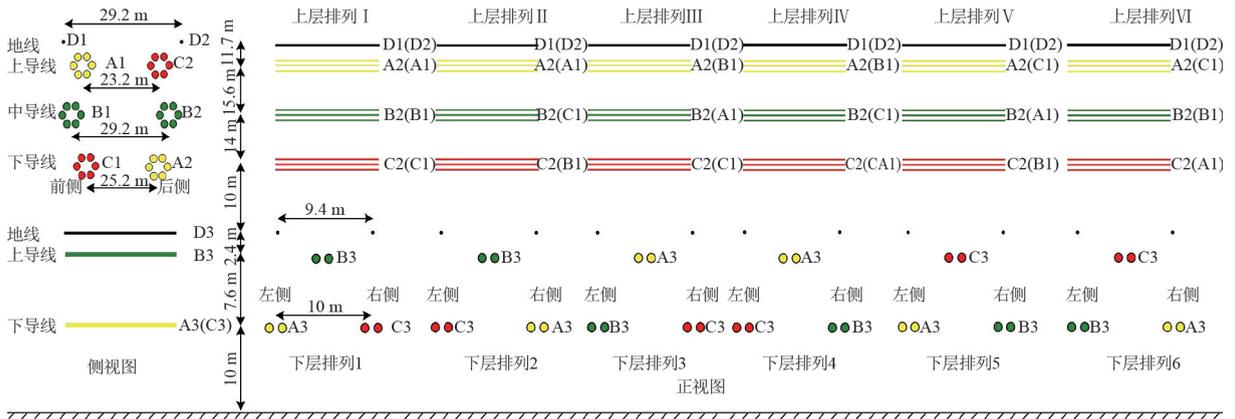


图 1 交叉输电线路空间布置方式及相序排列

$k_j$  为权重系数,  $\sum k_j = 1, k_j \in [0, 1]$ 。

## 2.1 导线相序排列方式对工频电磁场影响

### 2.1.1 导线相序排列方式对工频电场影响

对图1所示的交叉输电线路相序排列方式进行组合,根据式(9)求线下 $-40\text{ m} \sim 40\text{ m}$ 的正方形区域目标值 $F$ ,线路交叉角取 $90^\circ$ ,计算结果如表1所示。

表1 不同相序排列方式下区域电场强度

单位:  $\text{kV/m}$

330 kV 排列方式	750 kV 双回路排列方式					
	排列 I	排列 II	排列 III	排列 IV	排列 V	排列 VI
排列 1	6.23	4.39	6.51	5.54	4.03	4.88
排列 2	4.65	4.37	4.55	3.91	4.34	4.01
排列 3	6.90	6.21	6.51	4.36	5.53	4.06
排列 4	4.58	4.16	4.55	4.01	4.22	4.03
排列 5	6.78	6.21	6.35	4.25	5.55	4.04
排列 6	6.02	4.18	6.34	5.52	3.92	4.88

图2绘制出了考察区域内电场强度 $E$ 值。

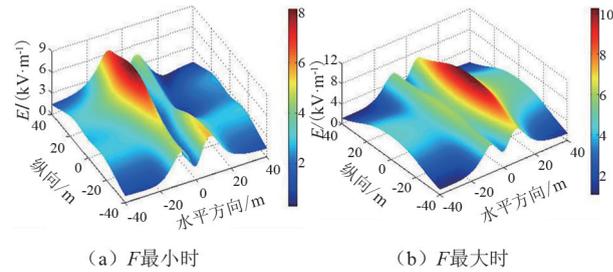


图2 交叉线路下方 $E$ 值

由表1及图2可以看出,交叉输电线路线下工频电场受上层相序排列方式影响较大。当上层双回路采取同相序排列时,线下加权平均场强都较大( $4.58 \sim 6.9\text{ kV/m}$ );当上层双回路采取逆相序排列时,线下加权平均场强都较小( $4.01 \sim 4.88\text{ kV/m}$ ),实际工程中可以采取上层线路逆相序排列方式。

### 2.1.2 导线相序排列方式对工频磁场影响

与工频电场相似,求解线下区域目标值 $F$ ,计算结果如表2所示。

表2 不同相序排列方式下区域磁感应强度

单位:  $\mu\text{T}$

330 kV 排列方式	750 kV 双回路排列方式					
	排列 I	排列 II	排列 III	排列 IV	排列 V	排列 VI
排列 1	13.88	12.53	13.40	10.97	11.06	9.86
排列 2	13.91	13.47	13.02	11.07	12.58	11.13
排列 3	13.90	12.04	14.11	12.37	10.93	11.09
排列 4	13.89	12.52	14.46	13.61	12.38	12.87
排列 5	13.86	13.86	13.33	12.51	13.64	12.81
排列 6	13.82	13.40	14.08	13.66	13.55	13.54

图3绘制出了考察区域内磁感应强度 $B$ 值。

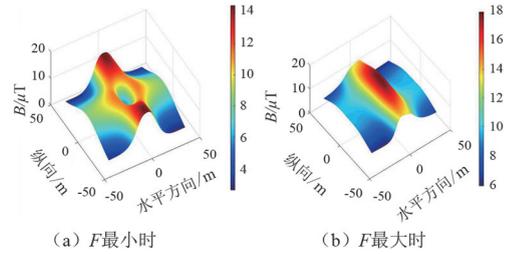


图3 交叉线路下方 $B$ 值

由表2及图3可以看出,交叉输电线路线下工频磁场受上层相序排列方式影响较大。当上层双回路采取同相序排列时,线下加权平均场强都较大( $13.82 \sim 13.91\ \mu\text{T}$ );当上层双回路采取逆相序排列时,线下加权平均场强都较小( $9.86 \sim 13.54\ \mu\text{T}$ )。因此,在实际工程中推荐采取双回路逆相序排列方式。

## 2.2 线路交叉角对工频电磁场影响

利用2.1所得结果,考察工频电场区域目标值 $F$ 最小时的相序布置方式,区域目标值 $F$ 随角度变化情况。目标区域函数值 $F$ 随线路交叉角变化情况如图4所示。

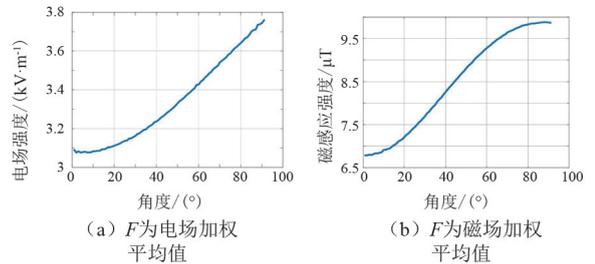


图4 目标区域函数值 $F$ 随线路交叉角变化情况

由图4可见,随交叉角的增大,目标区域函数值 $F$ 也相应增大。为提高输电通道本质安全,相关部门要求重要输电线路交跨角不宜小于 $45^\circ$ ,其线路下方电磁环境如图5所示。

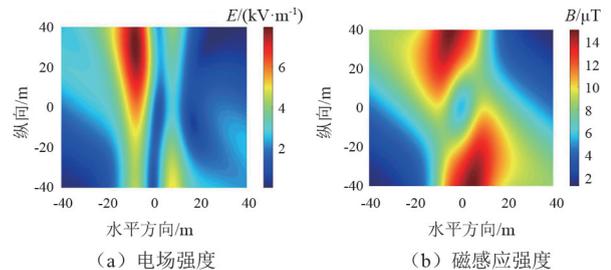


图5 交叉角 $45^\circ$ 时线路下方电磁环境

## 3 屏蔽措施

由上述内容可知,交叉线路下方电场强度受相

序排列组合及交叉角影响,区域目标值  $F$  最小时,线下场强呈现的马鞍面加权平均场强不超标,而沿下层线路方向单侧场强超出标准要求。因此,采用在导线下方架设屏蔽线的方式减小地面工频电场。对屏蔽线架设位置采用 CPSO 算法进行寻优,实现屏蔽优化设计。

### 3.1 CPSO 算法

标准粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 的数学描述为:假设在一个  $d$  维的目标搜索空间中,有  $m$  个代表潜在问题解的粒子组成的一个种群  $S = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ , 该种群中的第  $k$  个元素  $X_k = \{x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kd}\}$ , 表示第  $k$  个粒子在  $d$  维空间的一个矢量点。用  $P_{kd}(p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kd})$  记录第  $k$  个粒子自身搜索到的最优点。而在这个种群中,搜索到的最好值记为  $g$ , 则  $P_{gd} = (P_{g1}, \dots, P_{gd})$ 。可以用  $V_k(v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{kd})$  表示第  $k$  个粒子的速度。PSO 算法采用式 (10) 实现。

$$\begin{cases} V_{(t)kd} = w \cdot V_{(t-1)kd} + c_1 \cdot \text{rand}_1(P_{(t-1)kd} - X_{(t-1)kd}) + \\ c_2 \cdot \text{rand}_2(P_{(t-1)gd} - X_{(t-1)gd}) \\ X_{(t)kd} = X_{(t-1)kd} + V_{(t)kd} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\text{rand}()$  产生  $(0, 1)$  之间的随机数;  $w$  为惯性权重系数;  $c_1, c_2$  为每个粒子的学习因子;  $t-1, t$  为粒子运动时刻。

惯性权重系数取以时间为变量的非线性函数, 如式 (11) 所示。

$$w(t) = (w_{\max} - w_{\min}) \times \tan(0.875 \times \left[ 1 - \left( \frac{t}{t_{\text{iter}}} \right)^K \right]) + w_{\min} \quad (11)$$

式中:  $t_{\text{iter}}$  为最大进化代数;  $t$  为当前进化数;  $K$  为控制因子;  $w_{\max}, w_{\min}$  为惯性权重区间上、下限。

PSO 算法存在易陷于局部最优、优化计算精度低、后期收敛慢的缺点。故根据混沌运动的随机性、遍历性等特点, 采用混沌控制参数变化的粒子群优化算法进行寻优计算。混沌 (chaos) 是由确定方程得到的非确定随机运动状态, 具有随机性、便利性及规律性等特点, 能在一定范围内不重复地遍历所有状态。逻辑斯谛方程是一个典型的混沌系统, 其公式为

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n) \quad (12)$$

式中:  $\mu$  为混沌控制参数;  $x_n$  为混沌变量,  $x_n \in [0, 1]$ 。

CPSO 算法具体的流程描述如图 6 所示。

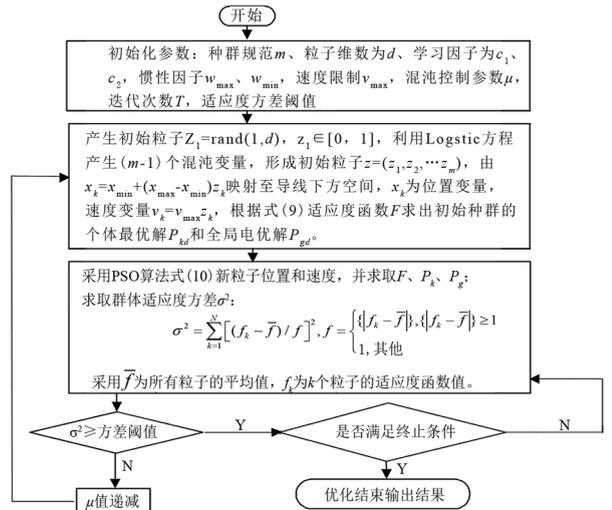


图 6 CPSO 算法流程

由于混沌变量的遍历性和随机性有助于增强种群的搜索能力, 在算法运行过程中, 根据种群的收敛情况, 动态地减小式 (12) 中混沌控制参数  $\mu$ , 降低混沌运动对种群结构的破坏, 摆脱陷入局部最优的困境。

### 3.2 CPSO 算法优化屏蔽仿真实验

以区域目标函数  $F$  作为 CPSO 算法的适应度函数, 并沿下层线路方向架设屏蔽线, 屏蔽线高度  $l_h$  在  $[0, 20]$  区间取值, 水平位置  $l_p$  在  $[-30, 30]$  区间取值。分别对架设单根及两根屏蔽线的位置进行寻优, 得到适应度函数收敛曲线, 如图 7 所示。由图可见, 混沌变参数粒子群优化算法在保证算法能摆脱局部最优的基础上, 明显提高了收敛性能。

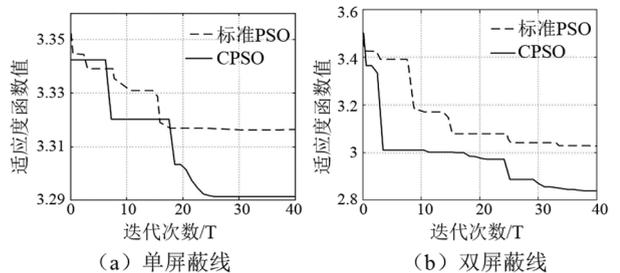


图 7 适应度函数收敛曲线

对屏蔽线架设位置通过 CPSO 算法寻优, 得到的架设位置为: 单屏蔽线  $l_h = 2.32 \text{ m}$ 、 $l_p = -8.49 \text{ m}$ ; 双屏蔽线  $l_{h1} = 3.12 \text{ m}$ 、 $l_{p1} = 7.80 \text{ m}$ 、 $l_{h2} = 2.32 \text{ m}$ 、 $l_{p2} = -8.50 \text{ m}$ 。架设屏蔽线后, 考察  $-40 \text{ m} \sim 40 \text{ m}$  正方形区域内, 交叉线路下方场强如图 8 所示。

(下转第 88 页)

# 布置于线路中部的500 kV独立串抗站技术方案探讨

曹尹<sup>1</sup>,李龙才<sup>1</sup>,郭劲<sup>1</sup>,伍晓伦<sup>1</sup>,李春梅<sup>2</sup>

(1.中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川成都,610021;

2.国网四川省电力公司经济技术研究院,四川成都 610041)

**摘要:**相比于常规的紧邻500 kV变电站布置的串抗站,布置于500 kV线路中部的独立串抗站从接线型式的选择到站用电及接地的设计原则均有其特殊性。文中以四川500 kV尖彭串抗站为例,对独立布置于线路中部的500 kV串抗站的主要技术原则进行探讨。通过对已建串抗站设计方案的调查研究,结合相关规程规范,同时考虑网省公司运行、调度等部门的要求,提出了500 kV独立串抗站的主要设计原则。

**关键词:**串联电抗器;独立串抗站;技术方案

中图分类号:TM 76 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)03-0057-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220310

## Discussion on Technical Scheme of 500 kV Independent Series Reactor Station Arranged in the Middle of Line

CAO Yin<sup>1</sup>, LI Longcai<sup>1</sup>, GUO Jin<sup>1</sup>, WU Xiaolun<sup>1</sup>, LI Chunmei<sup>2</sup>

(1.CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;

2.State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Compared with the common series reactor station arranged next to 500 kV substation, the independent series reactor station arranged in the middle of 500 kV line has its particularity from the selection of connection type to the design principle of power supply and grounding. Taking Sichuan 500 kV Jianpeng series reactor station for example, the main technical principles for 500 kV series reactor station arranged independently in the middle of line are discussed. Through the investigation and research of the built series reactor stations and combined with the related procedure specifications, and considering the requirements of operation and dispatching departments in power grid company, the main design principles of 500 kV independent series reactor station are proposed.

**Key words:** series reactor; independent series reactor station; technical scheme

## 0 引言

随着电力系统容量的不断增大,电网的短路电流水平迅速提高,需要采取措施进行限制。目前,国内500 kV电网限制短路电流的主要措施是在500 kV线路上装设串联限流电抗器<sup>[1-2]</sup>。一般情况下,500 kV串抗站应紧邻变电站设置,可与变电站共用水电等辅助设施,同时便于巡视检修。但因各种原因,有些线路两端的变电站无串抗站扩建条件,需在500 kV线路沿线寻找场地进行建设。

与紧邻变电站布置的500 kV串抗站相比,布置于500 kV线路中部的独立串抗站的电气接线形式、站用电设计原则、接地设计原则均有其特殊性。下面依托四川500 kV尖彭串抗站的具体设计实例,通过对已建串抗站设计方案的调查研究,结合相关规程规范,并综合网省公司运行、调度等部门的要求,对在500 kV线路中部建设的独立串抗站的电气接线形式、设备型式、过电压和绝缘配合、电气布置方式、站用电方案及接地方案等技术原则进行了探讨;提出了适用于布置于线路中部的500 kV独立串抗站的主要技术方案。

## 1 500 kV 尖彭串抗工程

近年来,四川电网短路电流水平超标问题日益突出。2020年尖山、东坡等 500 kV 变电站高压侧短路电流均已超过 63 kA。为控制 500 kV 电网短路电流水平,提高成都负荷中心供电可靠性,需在尖山—彭祖 500 kV 线路加装串联电抗器,其额定阻抗值为 28  $\Omega$ ,额定电流为 4000 A。

尖山 500 kV 变电站、彭祖 500 kV 变电站及尖彭 500 kV 线路均位于四川天府新区境内,土地资源紧张,两端变电站均不具备串抗站扩建条件。通过与当地政府沟通,确定距彭祖站约 3 km 的洪塘南站址为串抗站唯一站址,尖彭串抗站需脱离尖山变电站和彭祖变电站单独布置。

## 2 串抗站的接线型式

500 kV 串抗站主要由串联电抗器、避雷器、耦合电容器及其控制保护设备等主要元件构成。根据调研情况,目前国内已建或在建的 8 座 500 kV 串抗站中,其接线方案主要有以下两种形式:

### 1) 常规接线方案

串联电抗器组串接于线路中,电抗器端部根据过电压计算结果确定是否并联对地耦合电容或并联避雷器。为便于检修及更改运行方式,串联电抗器两端各设置一组隔离开关,同时在两端检修隔离开关外侧设置旁路回路及 1 组旁路隔离开关。串抗站两侧出线各配置 1 组线路避雷器。该方案具体接线形式如图 1 所示,图中避雷器 MOA 根据过电压计算结果研究是否安装。

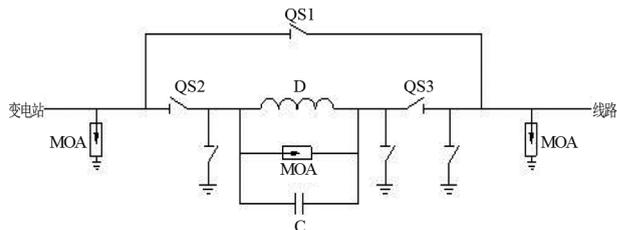


图 1 限流串抗站接线(采用隔离开关)

### 2) 简化接线方案

简化接线方案与常规接线方案类似,串联电抗器组串接于线路中,设置旁路回路。但电抗器两端不装设检修隔离开关,旁路回路不装设旁路隔离开

关。检修及运行方式切换通过设置可拆卸导线,用改接导线方式来实现。简化方案具体接线形式如图 2 所示,图中避雷器 MOA 根据过电压计算结果确定是否安装。

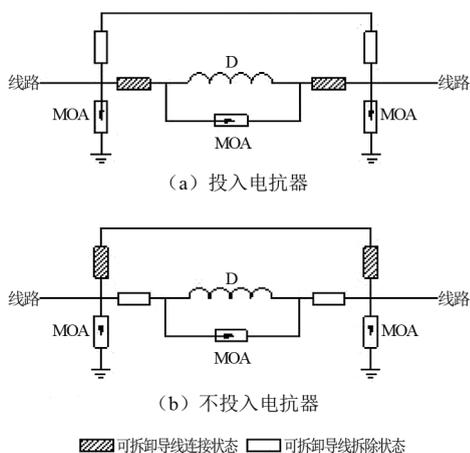


图 2 限流串抗站接线(采用可拆卸导线)

根据调研情况(见表 1),在国内已建或在建的 8 座 500 kV 串抗站中,有 6 座串抗站为紧邻变电站布置方式,其接线形式均采用方案 1 所示常规接线方案。有 2 座为布置于线路中部的独立串抗站,其接线形式有 1 座采用常规接线方案,另有 1 座采用简化接线方案。

表 1 已建串抗站接线形式调研情况

工程名称	串抗位置	接线形式
500 kV 杨行—外高桥 线路串抗站	临近变电站	常规接线
500 kV 远东—亭卫 线路串抗站	线路中部	常规接线
500 kV 江陵—团林 线路串抗站	临近变电站	常规接线
500 kV 纵江—宝安串抗站	线路中部	简化接线
500 kV 鹏城—深圳串抗站	临近变电站	常规接线
500 kV 石碑—常熟南串抗站	临近变电站	常规接线
500 kV 金华—万象串抗站	临近变电站	常规接线
500 kV 江门—西江串抗站	临近变电站	常规接线

技术上,两接线方案均设有旁路回路,在线路停电后,均可以实现串联电抗器接入线路运行和串联电抗器不接入线路运行的运行方式切换。

常规接线方案设置有隔离开关,运行方式的切换可通过操作隔离开关实现,切换更为便捷。但根据运行规程,若站内安装隔离开关等设备,需将隔离开关监控信号上传至调度。因此,常规接线方案需配置隔离开关监控设备及远动通信设备。而根据 DL/T 5155—2016《220 kV ~ 1000 kV 变电站站

用电设计技术规程》的规定,隔离开关监控设备及远动通信设备需要配置交直流站用电系统,并需要双电源供电,最终导致串抗站的站用电系统需按500 kV变电站的原则进行配置,设置2回外接电源。不仅如此,监控、通信设备及站用电系统需要设置电气设备间,进而增加建筑相关的消防设施等。对紧邻变电站布置的串抗站而言,上述监控、通信、站用电及消防系统均可共用变电站内相关已建设施,投资增加不多。但对独立布置的串抗站来说,上述一系列技术要求会导致串抗站的设计方案臃肿复杂,投资增大。

简化接线方案取消隔离开关,运行方式的切换通过改接跳线实现。由于取消隔离开关,站内不需配置电气设备的监控系统,站内二次部分仅需配置视频及安全警卫系统即可。视频信号不需上传调度,因此可采用无线专网方式传至就近变电站,站内不需设置远动通信设备。由于取消了设备监控及远动通信系统,站用电接线也可进一步简化,仅需采用单回外接电源。视频及安全警卫系统、单回外接电源可室外布置,又可以取消电气设备间及消防设施。简化接线方案接线简单,投资少,正常使用时运维工作量小。但简化接线方案切换运行方式需改接站内设备连线,工作量大,用时长。当系统运行方式需要串联电抗器较为频繁地投退时,该方案是不适合的。例如,在某些短路电流不超标的运行方式下,将串联电抗器退出运行以减小线损,在某些短路电流存在超标风险的运行方式下,再将串联电抗器接入线路运行。此时,串联电抗器要面临较频繁地投切,采用简化接线方式显然是不合适的。

因此,线路中部的500 kV独立串抗站的接线形式不仅需要充分考虑各种边界条件,也需与运行、调度等部门密切协商,最终确定接线方案。尖彭串抗站经网省公司各部门充分讨论,确认串抗正常运行时不考虑切换运行方式,仅需保留串联电抗器设备故障时进行运行方式切换的可行性。根据调研,500 kV串联电抗器设备故障率极低,因此可认为本工程切换运行方式频次极低,可考虑采用简化接线方案。

对于独立串抗站而言,简化接线方案可有效地简化二次系统、站用电系统、建筑及消防系统,并减少检修和运行维护工作量。若运行方式允许,独立串抗站建议采用简化接线方案。

## 3 串抗站的设备选型及电气布置

### 3.1 串联电抗器

500 kV串联限流电抗器一般采用干式空芯电抗器。干式空芯电抗器具有较大的电感线性范围,阻抗值比较稳定,更适宜作为限流电抗器使用。油浸式电抗器在系统短路时,铁芯容易达到铁磁饱和,导致阻抗值有较大波动,一般不宜作为限流电抗器使用。

除上述特点外,干式空芯电抗器还具有噪声较低、无火灾危险、绝缘接地简单、能量反向(逆转)时无严重的电(介质)应力、对瞬时过电压的反应较小、重量轻、运输使用方便、投资和维护费用低等特点。因此,尖彭串抗站工程采用干式空芯电抗器,电抗器额定阻抗为 $28\ \Omega$ ,额定电流为4 kA。因阻抗值较大,需采用2台 $14\ \Omega$ 、4 kA电抗器串联实现。

### 3.2 过电压和绝缘配合

在线路中部安装串联电抗器后,对于电网运行以及电气设备将产生一些新的要求。特别是线路两端断路器在开断短路电流时,其断口瞬态恢复电压可能会超过断口绝缘恢复强度,从而使断路器不能正常开断短路电流,造成事故扩大化。因此串抗站必须校验两端断路器的瞬态恢复电压是否满足,确定是否需要采取防护措施来限制断路器瞬态恢复电压<sup>[3]</sup>。

经计算,尖彭串抗站需串联电抗器两端并联耦合电容用以限制瞬态恢复电压幅值及陡度。采取上述措施后,两端变电站断路器瞬态恢复电压满足相关标准要求。串抗站设计时,另需计算串联电抗器端对端的过电压幅值,以确定串联电抗器两端是否需要并联避雷器。经计算,尖彭串抗站无需在串联电抗器两端并联避雷器。

综上,尖彭串抗站仅需在串抗站两侧出线处配置线路避雷器。

### 3.3 配电装置型式与布置

独立串抗站配电装置一般采用敞开式常规中型布置,全站共设两排构架,一排为进线构架,另一排为出线构架,如图3所示。两排构架间布置串联电抗器及可拆卸导线,旁路回路采用架空方式布置于串联电抗器上方。出线构架宽度根据串联电抗器的布置方案确定,出线构架高度按26 m设计,如图4

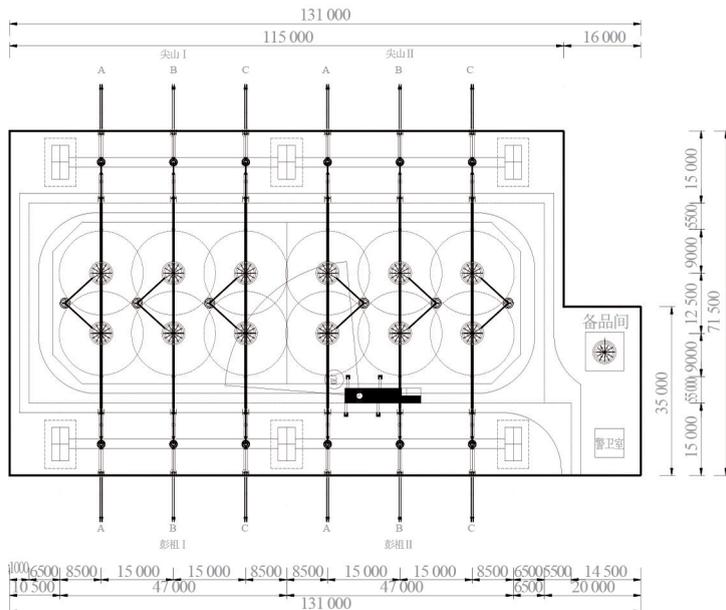


图 3 串抗站电气平面布置

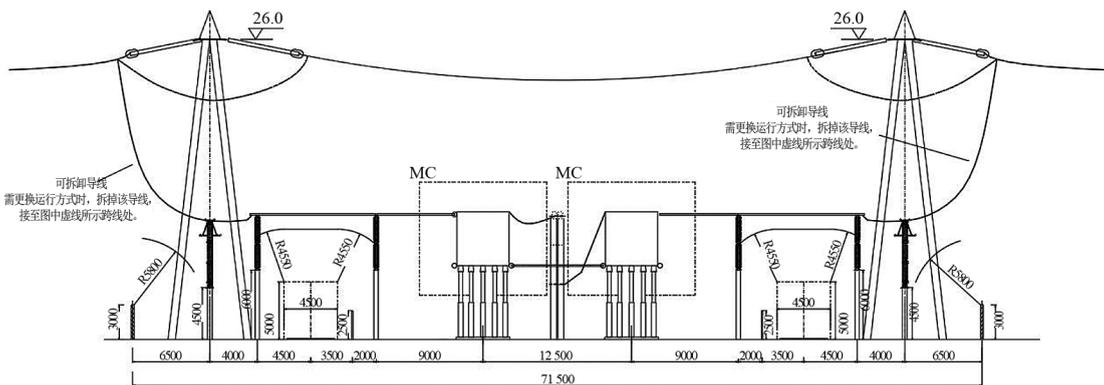


图 4 串抗站电气断面布置

所示。站内需设计站前区,站前区布置有警卫室、串抗站备用相备品间。

尖彭串抗站每相串联电抗器采用 2 台干式空芯电抗器串联而成,全站两回出线共安装 12 台干式空芯电抗器。考虑防磁范围,每相 2 台串联的电抗器间距按 12.5 m 设计。因尖彭串抗站需装设 500 kV 耦合电容器,为确保耦合电容器在相邻的 4 台串联电抗器防磁范围线之外,串联电抗器相间距离需按 15 m 设计。

串联电抗器及耦合电容器均采用低位布置。串联电抗器四周设置玻璃钢围栏,避免人员靠近。为方便检修,串联电抗器四周设置环形道路,串联电抗器与出线构架间采用支柱绝缘子支撑管母线跨越环形道路,出线避雷器布置于构架下方。线路与出线避雷器采用软导线引下连接,该处导线为可拆卸导线,后期若需变更运行方式,可将该引下线改接至上

层跨线处。

需要特别说明的是,根据调研情况,500 kV 串联电抗器的漏磁比较严重。因此,串抗站的设计细节上必须考虑串联电抗器漏磁的影响。如串联电抗器设备应设置围栏阻隔,且围栏应设置在串联电抗器设备的 MC2 防磁范围线外,避免人员进入 MC2 防磁范围后产生不适感;又如串联电抗器设备间连线应尽量采用没有铁芯的铝管母线,以避免导线发热;在必须采用软导线的地方,也应尽量采用多分裂的纯铝绞线。

### 3.4 站用电

采取简化接线后,独立串抗站正常运行时站用电负荷较小,最大用电负荷仅为几千瓦。但站内须考虑检修用负荷,因此独立串抗站站用变压器容量宜设为 100 kVA。

(下转第 72 页)

# 海上柔性直流输电工程直流电压等级确定方法

陈鹏,周国梁,马亮,杨金根,梁言桥,周思远

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司,湖北 武汉 430071)

**摘要:**随着海上风电机组大型化以及投资规模的不断扩大和建设成本逐渐下降,近海风电资源日趋紧张,基于柔性直流输电技术的大规模、远距离海上风电送出工程得到了较大的应用。在海上风电柔性直流输电工程中,直流电压等级是体现输送能力的重要技术参数。文中基于IGBT器件的稳态和暂态通流能力以及直流海缆载流量限制要求,提出了一种海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级确定方法。并在此基础上,以某900 MW海上风电柔性直流输电工程为例,给出了工程案例的直流电压等级确定流程。所提出的海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级确定方法,有利于降低工程建设成本并推进中国远海风电大规模集约开发与并网技术的发展。

**关键词:**海上风电;柔性直流输电;IGBT器件;直流海缆;直流电压等级

中图分类号:TM 853 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)03-0061-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220311

## Method of DC Voltage Level Determination for Offshore VSC-HVDC Transmission Project

CHEN Peng, ZHOU Guoliang, MA Liang, YANG Jingen, LIANG Yanqiao, ZHOU Siyuan

(Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, Hubei, China)

**Abstract:** With the increasing of the scale of offshore wind turbines and investment and the gradual decline of construction costs, offshore wind power resources are becoming increasingly scarce. Large-scale and long-distance offshore wind power transmission project based on voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) technology have been widely deployed. In offshore wind power VSC-HVDC transmission project, the DC voltage level is an important technical parameter to reflect the transmission capacity. Based on the limitation requirements of steady-state and the transient ampacity of IGBT devices as well as DC marine cables, a method for determining DC voltage level of offshore wind power VSC-HVDC transmission project is proposed. On this basis, taking a 900 MW offshore wind power VSC-HVDC transmission project for example, the process of determining DC voltage level of the engineering case is given. The proposed method is conducive to reducing construction costs, which is of great significance to promote the large-scale intensive development of offshore wind power and the development of grid integration technologies.

**Key words:** offshore wind power; VSC-HVDC transmission; IGBT devices; DC marine cable; DC voltage level

## 0 引言

海上风电具有风能资源稳定性强、年利用小时高等显著特点,近年来海上风力发电技术在全世界各地飞速发展<sup>[1-3]</sup>。目前海上风电并网输电主要有两种典型方式:高压交流输电和柔性直流输电。高压交流输电主要是通过建设海上交流升压站,汇集海上风电场的电能并送至陆上的电网,适用于规模小、

近距离风电场的电能送出。随着海上风电机组大型化、投资规模的不断扩大和建设成本逐渐下降,近海风电资源日趋紧张。基于柔性直流输电技术的大规模、远距离海上风电送出工程已成为了海上风电发展和研究的热点,在欧洲北海地区的海上风电输电工程中得到了较广泛的应用<sup>[4]</sup>。

在海上风电柔性直流输电工程主要由海上换流站、陆上换流站和直流海缆等部分构成。一般情况下,海上换流站和直流海缆的投资成本占据了整个

海上风电柔性直流输电工程投资总成本的 70% 以上,是大容量、远距离海上风电柔性直流输电工程的关键设施<sup>[5]</sup>。

在工程建设前期,直流电压等级是海上风电柔性直流输电工程的重要技术参数。对于海上换流站核心电气设备换流阀来说,在绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT) 器件额定电压确定的情况下,直流电压等级直接影响了模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC) 子模块的级联个数,与换流阀的制造成本几乎成线性关系;另一方面,直流电压等级及其过电压水平很大程度上决定了海上换流站的体积质量,从而成为了决定海上换流站平台建造的关键因素。此外,在工程额定输送容量确定的情况下,直流电压等级也是影响直流海缆的绝缘厚度和制造难度的关键参数,能够直接决定直流海缆的生产制造成本。因此,选择合适的直流电压等级,确定直流电压等级范围,对于工程的实施建设和成本的把控具有重要意义<sup>[6]</sup>。

目前,国内暂无成熟的海上风电柔性直流输电工程的设计和建设经验,尚处于探索和起步阶段。针对确定海上风电柔性直流输电工程电压等级的方法还研究得较少,特别是从 IGBT 器件参数、直流海缆选型等方面对海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级确定的研究工作。

下面针对现有技术的不足,基于 IGBT 器件稳态电流运行区间,给出了海上风电柔性直流输电工程的直流电压取值范围,并根据 IGBT 暂态电流限值,对直流电压取值范围进行修正。进一步根据直流海缆载流量限值要求,确定工程的直流电压等级。并在此基础上,以某 900 MW 海上风电柔性直流输电工程为例,给出了工程案例的直流电压等级确定流程。

## 1 海上柔性直流换流站电气主接线

现阶段大容量柔性直流输电工程主要采用损耗、谐波更低、大电平数目的 MMC 的拓扑结构,其换流单元及直流侧接线方式主要采用对称单极接线(伪双极)和对称双极接线(真双极),具体接线方式的选择与两端换流站的交流系统规模和条件、柔性直流输电系统的可靠性、工程建设成本等因素有关<sup>[7-9]</sup>。

针对海上风电柔性直流输电工程来说,对称双极接线方式可靠性较高,运行方式较灵活。但对称双极接线的电气设备较多,换流变压器需考虑直流偏置电压,且直流线路需增加一回中性线海缆,海上柔性直流换流站和直流海缆的投资费用均较高。受海上柔性直流换流站的平台尺寸和重量限制,以及直流海缆对工程造价的影响,海上风电柔性直流输电工程通常采用对称单极接线形式。海上柔性直流换流站典型的对称单极接线方式如图 1 所示,该接线方式为单个换流单元构成的双极系统,通过交流侧中性点接地,呈现出了对称的正、负极性的直流线路。

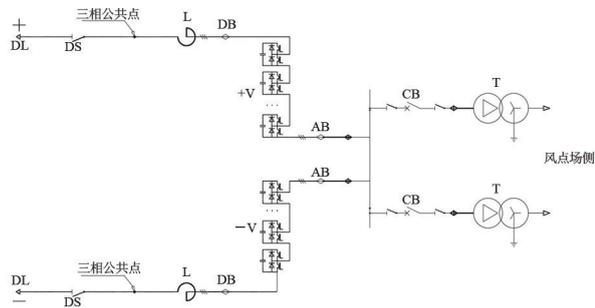


图 1 海上柔性直流换流站电气主接线

图 1 中:T 为换流变压器;CB 为交流断路器;AB 为交流穿墙套管;V 为换流阀;DB 为直流穿墙套管;L 为桥臂电抗器;DS 为直流隔离开关;DL 为直流海缆终端。

## 2 直流电压等级确定方法

### 2.1 IGBT 稳态运行条件限制

IGBT 是海上风电柔性直流输电工程中的核心部件,因此,要保障其安全、稳定、高效地运行,IGBT 器件的电气参数限制对工程设计有着举足轻重的影响。IGBT 器件的稳态和暂态通流能力以及耐受电压等参数会影响输电系统的功率传输,从而对直流电压等级选择产生影响。

为了避免 IGBT 长时间运行在额定电流下而出现故障,定义  $\lambda$  为每个 IGBT 器件的稳态电流经济运行系数,记为  $\lambda = i_{\text{arm\_rms}} / i_e$ ,其中: $i_{\text{arm\_rms}}$  为换流阀桥臂工作电流; $i_e$  为 IGBT 器件的额定电流。 $\lambda$  根据工程经验取值通常在 0.50~0.65。

根据海上风电柔性直流输电工程的直流输送容量  $P_e$ ,可以计算出直流极线电流  $i_{dc}$  和联接变压器网侧功率  $S_e$ ,如式(1)所示。

$$\begin{cases} i_{dc} = P_e / U_{dc} \\ S_e = P_e / \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_{dc}$  为正负极间电压;  $\cos \varphi$  为联接变压器网侧功率因数, 通常  $0.9 \leq \cos \varphi \leq 1.0$ , 并具备发出和吸收无功功率的能力;  $U_{dc}$  为正负极间电压。

联接变压器阀侧电压  $U_v$  和基频电流  $i_{v(1)}$  的表达式如式(2)所示。

$$\begin{cases} U_v = \frac{\sqrt{3}M \times U_{dc}}{2\sqrt{2}} \\ i_{v(1)} = \frac{P_e}{\sqrt{3}U_v \cos \varphi} = \frac{2\sqrt{2}P_e}{3M \times U_{dc} \cos \varphi} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $M$  为换流器调制比, 通常  $0.75 \leq M \leq 0.95$ 。

考虑到 IGBT 桥臂电流中, 占主要组成部分的是直流分量、基波分量  $i_{v(1)}$  和二倍频分量  $i_{v(2)}$ , 所以 IGBT 桥臂电流稳态有效值可以表达为<sup>[10-11]</sup>

$$i_{arm\_rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{3} \times i_{dc}\right)^2 + \frac{1}{4} \times i_{v(1)}^2 + \frac{1}{4} \times i_{v(2)}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{3} \times \frac{P_e}{U_{dc}}\right)^2 + \frac{1}{4} \times \left(\frac{2\sqrt{2}P_e}{3M \times U_{dc} \cos \varphi}\right)^2 + \frac{1}{4} \times \left(\frac{2\sqrt{2}k_{(2)}P_e}{3M \times U_{dc} \cos \varphi}\right)^2} \quad (3)$$

式中,  $k_{(2)}$  为桥臂电流二倍频分量相对基波分量的比例, 通常  $k_{(2)} \leq 0.3$ 。

根据式(3)可以推导出  $U_{dc}$  的表达式为

$$U_{dc} = \frac{\sqrt{(M \cos \varphi)^2 + 2(1 + k_{(2)}^2)P_e}}{3\lambda M i_e \cos \varphi} \quad (4)$$

因此, 可以根据  $\lambda$  的取值范围, 推导出  $U_{dc}$  的取值范围, 记为  $R_1$ 。

## 2.2 暂态运行条件限制

根据 2.1 节的推导内容可知, IGBT 桥臂电流稳态峰值  $i_{p\_arm}$  可以表达为

$$i_{p\_arm} = \frac{1}{3} \times i_{dc} + \frac{\sqrt{2}}{2} \times i_{v(1)} + \frac{\sqrt{2}}{2} \times i_{v(2)} = \frac{1}{3} \times \frac{P_e}{U_{dc}} + \frac{2P_e}{3M \times U_{dc} \cos \varphi} + \frac{2k_{(2)}P_e}{3M \times U_{dc} \cos \varphi} \quad (5)$$

因此, 阀基过流保护动作值为

$$i_{DZ\_arm} = k_{VBC} \times i_{p\_arm} \quad (6)$$

式中,  $k_{VBC}$  为可靠系数, 数值在 1.20~1.25。

发生换流站正、负极间故障时, 故障发生后到 IGBT 闭锁前, 上、下桥臂的子模块电容放电, 形成故障回路路径, 子模块电容、桥臂电抗器及线路阻抗组

成 RLC 振荡回路, 流经子模块的故障电流从故障发生时时刻起迅速增大, 故障电流  $i_{fault}$  上升率为

$$\frac{di_{fault}}{dt} = \frac{U_{dc}}{2 \times L_{arm}} \quad (7)$$

IGBT 闭锁后到交流系统跳开断路器结束, 子模块电容从短路故障回路中退出, 流经子模块的故障电流路径遵循 LR 一阶放电原理, 从 IGBT 闭锁时刻开始起, 故障电流不断减小, 换流站正、负极间故障的桥臂暂态故障电流可表达为

$$i_{fault} = i_{DZ\_arm} + t_p \times \frac{U_{dc}}{2 \times L_{arm}} \quad (8)$$

式中:  $t_p$  为阀基过流保护延迟时间;  $L_{arm}$  为单相桥臂电感。

根据第 2.1 节中所求出  $U_{dc}$  所属的  $R_1$  范围、阀基过流保护动作值及其延迟时间以及桥臂电抗器的电感值等, 可以求出每个 IGBT 器件在稳态电流经济运行区间内对应的桥臂暂态故障电流  $i_{fault}$  的范围, 记为  $R_2$ 。

根据 IGBT 器件暂态电流限制要求, 桥臂暂态故障电流应该小于暂态电流限值  $i_{fault\_max}$ 。因此可以根据范围  $R_2$ , 选取满足条件的 IGBT 器件。具体来说, 若待选 IGBT 器件满足条件  $\inf(R_2) < i_{fault\_max} < \sup(R_2)$ , 则可尝试调整  $U_{dc}$  的范围为  $R_1'$ , 得到新的桥臂暂态故障电流  $i_{fault}$  的范围, 记为  $R_2'$ , 使得  $\sup(R_2') < i_{fault\_max}$ , 此时可选取该器件; 若待选 IGBT 器件满足条件  $\sup(R_2) < i_{fault\_max}$ , 则可以选用该器件,  $U_{dc}$  的范围  $R_1$  保持不变, 并记  $R_1' = R_1$ ; 若待选 IGBT 器件满足条件  $\inf(R_2) > i_{fault\_max}$ , 则弃用该 IGBT 器件。

同时, 注意到  $i_{fault} < i_{fault\_max}$ , 将式(5)、式(6)、式(8)进行联立, 可得  $U_{dc}$  的自然范围  $R_N$ , 表达式如式(9)所示。

$$\begin{cases} R_N = \left( \frac{i_{fault\_max} - \sqrt{i_{fault\_max}^2 - 4AC}}{2A}, \frac{i_{fault\_max} + \sqrt{i_{fault\_max}^2 - 4AC}}{2A} \right) \\ A = \frac{t_p}{2L_{arm}}, C = k_{VBC} \times \left( \frac{1}{3} \times P_e + \frac{2P_e}{3M \cos \varphi} + \frac{2k_{(2)}P_e}{3M \cos \varphi} \right) \end{cases} \quad (9)$$

对  $R_1'$  和  $R_N$  求交集, 可以得到直流侧电压  $U_{dc}$  的取值范围  $R$ 。

## 2.3 直流海缆载流量限制

直流海缆在运行时, 各结构部分中产生的损耗热量向周围媒质散发, 将使周围媒质的温度升高。

由于高压直流海缆不存在交变的电磁场,故电缆线路的绝缘损耗可忽略,金属护套和铠装上几乎不产生损耗,其损耗主要是线芯的电阻损耗。单芯直流海缆额定载流量与导体温升及电缆结构中各部分等效热阻有关<sup>[12]</sup>。

当温度升高,使绝缘的温度等于直流海缆最高允许长期工作温度,此时流过直流海缆的负载电流称为海缆的长期容许电流。若直流海缆的长期容许电流大于或等于海上风电柔性直流输电工程的额定直流电流,则认为直流海缆可满足系统输送容量的要求。

在直流海缆选型过程中,若存在多种电压等级的直流海缆满足要求,则可选取直流电压等级最低的直流海缆,作为海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级。

## 2.4 直流电压等级确定流程

综上所述,海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级确定方法流程如图 2 所示。

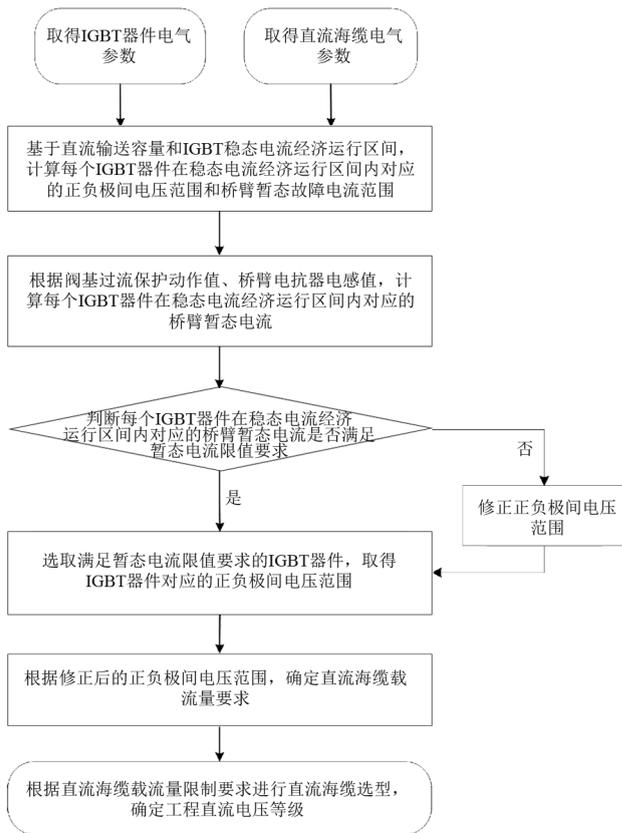


图 2 直流电压等级确定方法流程

## 3 工程实例分析

以某 900 MW 的海上风电柔性直流输电工程为例,对所提出的海上风电柔性直流输电工程的直流

电压等级确定方法进行进一步说明。

经调研,现阶段 IGBT 器件的主要电气参数包括额定电流和暂态电流限值,如表 1 所示;直流海缆的主要电气参数包括直流电压等级和最大导体截面对应的直流海缆载流量,如表 2 所示。

表 1 IGBT 器件电气参数

额定电流/A	暂态电流限值/A
1500	3000
2000	4000
3000	6000

表 2 直流海缆最大导体截面的载流量

直流电压等级/kV	最大导体截面/mm <sup>2</sup>	直流海缆最大载流量/A
±250	2500	2000
±320	2500	1875
±400	2500	1750

取联接变压器网侧功率因数  $\cos \varphi$  为 0.95,换流器调制比  $M$  为 0.85,桥臂电流二倍频分量相对桥臂电流基频分量  $k_{(2)}$  取 0.3,稳态电流经济运行系数  $\lambda$  取 0.50~0.65,阀基过流保护动作值可靠系数  $k_{\text{VBC}}$  取 1.2,  $t_p$  取 155  $\mu\text{s}$ ,  $L_{\text{arm}}$  取 60 mH。

根据上述参数,可以通过计算求出 IGBT 器件对应的工程直流电压范围,并进一步地计算每个 IGBT 器件在稳态电流经济运行区间内对应的桥臂暂态故障电流  $i_{\text{fault}}$  的范围。结果如表 3 所示。

表 3 IGBT 器件在稳态电流经济运行区间内的直流电压和桥臂暂态故障电流

输送容量/MW	额定电流/A	正负极间电压 $U_{\text{dc}}$ /kV	桥臂暂态故障电流/A
900	1500	641.2~833.6	2 899.1~3 197.3
900	2000	480.9~625.2	3 237.3~3 779.9
900	3000	320.6~416.8	4 183.0~5 152.2

由表 1 和表 3 可知,直流输送容量 900 MW,采用额定电流 1500 A 的 IGBT 器件,其暂态电流限值 3000 A 位于稳态电流经济运行区间内对应的桥臂暂态故障电流范围的最小值与最大值之间。据此可求得  $U_{\text{dc}}$  的范围在 746.0~1 576.6 kV,将此范围与表 3 中的  $U_{\text{dc}}$  范围求交集,修正后  $U_{\text{dc}}$  的范围为 746.0~833.6 kV,从而使得  $\sup(i_{\text{fault}}) < i_{\text{fault\_max}}$ ,满足工程应用需要。

采用额定电流 2000 A 和 3000 A 的 IGBT 器件,其在稳态电流经济运行区间内对应的桥臂暂态故障电流  $i_{\text{fault}}$  的最大值均小于暂态电流限值  $i_{\text{fault\_max}}$ ,故其均能够满足工程应用要求。

根据直流输送容量和修正后的 IGBT 器件在稳态电流经济运行区间内对应的正负极间电压的范围,计算直流海缆载流量要求,如表 4 所示。

表4 IGBT器件在稳态电流经济运行区间内  
直流海缆载流量要求

输送容量/MW	额定电流/A	正负极间电压 $U_{dc}/kV$	直流海缆载流量/A
900	1500	746.0~833.6	1 079.6~1 206.4
900	2000	480.9~625.2	1 439.5~1 871.4
900	3000	320.6~416.8	2 159.3~2 807.0

根据表4所示的直流海缆载流量要求,结合取得的供选用的直流海缆的最大导体截面对应的直流海缆载流量,进行直流海缆选型。若有多种电压等级的直流海缆满足要求,选取直流电压等级最低的直流海缆。最终选择的直流海缆的直流电压等级即为海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级。针对表4直流电压和载流量要求进行直流海缆选型,根据表2收集的直流海缆参数可知:采用额定电流1500 A的IGBT器件,正负极间电压范围为746.0~833.6 kV,需选用直流电压等级为 $\pm 400$  kV的直流海缆,载流量为1 079.6~1 206.4 A,小于直流海缆最大载流量1750 A,可用;采用额定电流2000 A的IGBT器件,正负极间电压范围为480.9~625.2 kV,需选用直流电压等级为 $\pm 250$  kV的直流海缆,直流电流范围为1 439.5~1 871.4 A,小于直流海缆最大载流量2000 A,可用;采用额定电流3000 A的IGBT器件,正负极间电压范围为320.6~416.8 kV,直流电流范围为2 159.3~2 807.0 A,无符合的直流海缆,该IGBT器件弃用。

由于海上换流站直流电压等级越低,换流单元和直流场的过电压水平越低,海上换流站的体积和重量越小;再次,直流电压等级越低,直流海缆的绝缘要求越低,直流海缆的制造成本较小。因此,额定输送容量900 MW的海上风电柔性直流输电工程,推荐正负极间电压 $U_{dc}$ 为直流电压采用500 kV,即 $\pm 250$  kV直流电压等级。

## 4 结论

上面基于实际工程建设经验,提出了一种应用于海上风电柔性直流输电工程中的直流侧电压等级确定方法。

基于IGBT器件稳态电流运行区间,给出了海上风电柔性直流输电工程的直流电压取值范围,并根据IGBT暂态电流限值,对直流电压取值范围进行修正。进一步根据直流海缆载流量限值要求,

确定工程的直流电压等级。并在此基础上,以某900 MW海上风电柔性直流输电工程为例,给出了工程案例的直流电压等级确定流程。

所提出的海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级确定方法,能够为海上风电柔性直流输电工程的直流电压等级确定提供有效的计算方法,有利于降低工程建设成本,加快远海风电柔性直流输电工程建设。

## 参考文献

- [1] 刘卫东,李奇南,王轩,等.大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J].中国电力,2020,53(7):55-71.
- [2] 郑黎明,贾科,侯来运,等.基于奇异值分解的海上风电接入柔直系统的交流线路保护[J].中国电机工程学报,2020,40(增刊1):75-83.
- [3] 李景.用于海上风电并网的VSC-HVDC系统控制策略研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- [4] 徐政.柔性直流输电系统(2版)[M].北京:机械工业出版社,2016:179-193.
- [5] 李健涛.海上风电场接入柔性直流电网的故障穿越策略研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [6] 李浩原,周国梁,李文津,等.海上风电送出交流高压单芯电缆并联通流特性研究[J].四川电力技术,2020,43(1):12-16.
- [7] 龚英明.高压直流同步触发控制对后续换相失败的影响研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [8] 赵毓君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2011.
- [9] Hong RAO, Yuebin ZHOU, Shukai XU, et al. Key technologies of ultra-high voltage hybrid LCC-VSC MTDC systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019,5(3):365-373.
- [10] 管敏渊.基于模块化多电平换流器的直流输电系统控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [11] 王姗姗,周孝信,汤广福,等.模块化多电平换流器HVDC直流双极短路子模块过电流分析[J].中国电机工程学报,2011,31(1):1-7.
- [12] 卢毓欣,赵晓斌,李岩,等.海上风电送出用柔性直流换流站电气主接线[J].南方电网技术,2020,14(12):25-31.

## 作者简介:

陈鹏(1991),男,硕士,工程师,主要从事高压直流输电和柔性直流输电技术方面的研究工作。

(收稿日期:2021-12-21)

# 角钢塔曲臂 K 节点变形原因分析及对策研究

辜良雨<sup>1</sup>, 李林<sup>1</sup>, 廖邢军<sup>1</sup>, 刘翔云<sup>1</sup>, 陇源杰<sup>2</sup>, 付卫斌<sup>2</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;

2. 云南电网有限责任公司建设分公司, 云南 昆明 650051)

**摘要:**酒杯塔和猫头塔在单回交流输电线路中广泛应用, 曲臂 K 节点属于刚度相对薄弱点, 文中以某 500 kV 交流输电线路工程猫头塔曲臂 K 节点变形统计情况为例, 从设计、加工、施工三方面对曲臂 K 节点变形原因进行了深入分析, 提出了合适的结构措施和施工要求, 经过某新建工程验证, 控制措施效果显著, 值得在今后的铁塔设计、施工中借鉴采用。

**关键词:**猫头塔; 酒杯塔; 曲臂; K 节点; 变形控制

**中图分类号:** TM 752 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)03-0066-07

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20220312

## Cause Analysis and Countermeasure Research on K-joint Deformation of Angle-steel Tower

GU Liangyu<sup>1</sup>, LI Lin<sup>1</sup>, LIAO Xingjun<sup>1</sup>, LIU Xiangyun<sup>1</sup>, LONG Yuanjie<sup>2</sup>, FU Weibin<sup>2</sup>

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group,

Chengdu 610021, Sichuan, China; 2. Construction Branch of Yunnan Power Grid

Co., Ltd., Kunming 650051, Yunnan, China)

**Abstract:** Cup-tower and cathead tower are widely used in single circuit AC transmission lines, but the K-joint of crank arm is a relatively weak point in stiffness. Taking the deformation statistics of the K-joint of crank arm in cathead tower in a 500 kV AC transmission line project for example, the deformation causes of the K-joint of crank arm are analyzed from three aspects of design, processing and construction, and the appropriate structural measures and construction requirements are put forward. Through the verification of a new project, the effect of the control measures is remarkable, which is worthy of reference in the future tower design and construction.

**Key words:** cathead tower; cup-tower; crank arm; K-joint; deformation control

## 0 引言

在单回交流输电线路中, 悬垂直线塔通常有酒杯塔和猫头塔两种型式, 两种型式各有优缺点。酒杯塔导线呈水平排列、导线水平间距大、线路走廊宽、房屋拆迁多; 但由于塔头较低, 防雷效果较猫头塔更优, 且塔材耗钢量较轻。而猫头塔导线呈三角形排列, 具有导线水平间距小、线路走廊小、房屋拆迁少的优点; 但由于塔头较高, 防雷效果不如酒杯塔, 且塔材耗钢量较重。

铁塔型式选择与沿线的地形条件、交通条件、气

象条件、林木和房屋以及对线路有影响的设施分布情况、运行维护等有着密不可分的关系。由于酒杯塔和猫头塔各有优缺点, 两种塔型在工程中都得到了广泛应用。但酒杯塔和猫头塔的塔头上下曲臂 K 节点属于刚度相对薄弱点。500 kV 平武线送电线路工程<sup>[1]</sup>和 1000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程<sup>[2]</sup>均出现了曲臂 K 节点位移的情况且经过了试验验证。文献[3-4]通过现场调查、理论分析和真型试验 3 个方面, 分析了 K 节点位移及其对结构承载力的影响。文献[5]利用数理统计原理分析铁塔 K 节点变形, 给出了 K 节点变形值的合理范围<sup>[5]</sup>。

下面在上述研究成果的基础上,从设计、加工和施工的角度对角钢塔曲臂K节点变形原因进行分析,并结合理论研究和工程实践经验,提出有效控制角钢塔曲臂K节点变形的措施。

## 1 曲臂K节点变形情况调研

### 1.1 曲臂K节点

酒杯塔和猫头塔的共同特点是塔头由曲臂与导线横担构成,上下曲臂均为K节点连接结构。不同的是,酒杯塔边横担和中横担均在K节点以上,猫头塔边横担在K节点以下,如图1所示。

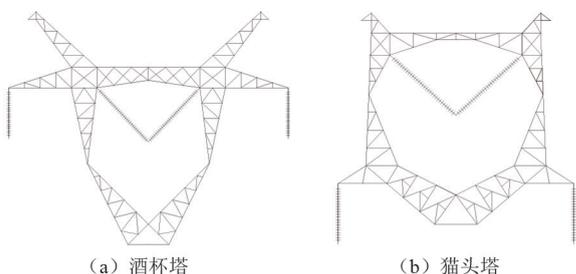


图1 酒杯塔、猫头塔塔头

上下曲臂采用K节点连接具有构造简单、传力清晰、施工方便等优点,但是K节点易产生水平方向变形,尤其对于导线三角排列的猫头塔,K节点向外鼓曲变形也是工程建设和运行维护中普遍存在的一个突出问题,曲臂K节点变形如图2所示。



图2 曲臂K节点变形实例及示意图

### 1.2 变形情况调研

以云南某500 kV交流输电线路工程为例,该工程采用南方电网典型设计5E1Y1、5E1Y2模块,在质检验收中发现有大量猫头塔曲臂K节点处存在不同程度的向外鼓曲变形。对各标段猫头塔进行了逐基测量,共得到479基铁塔的K节点位移值情况,详见表1。

表1 各标段猫头塔K节点单侧位移值统计

标段	塔数量/基	最小位移值/mm	最大位移值/mm	平均位移值/mm
1	31	16	32	23.4
2	83	30	43	36.4
3	34	20	38	29.1
4	51	15	38	26.4
5	143	24	39	32.6
6	35	35	50	43.5
7	15	30	46	37.7
8	28	24	64	49.1
9	7	41	52	47.3
10	34	40	70	45.4
11	18	40	60	45.9
合计	479	15	70	35.3

从测量数据可以看出:各标段猫头塔曲臂K节点向外鼓曲变形是普遍存在的现象;不同标段单侧位移值离散性较大,同一塔型在不同塔位甚至在同一标段位移相差较大;各标段单侧位移平均值为23.4~49.1 mm,与外曲臂主材的长度之比约为1/160~1/350。对所有塔位的位移情况进行统计分析,所有塔位K节点单侧位移最小值为15 mm,最大值为70 mm,平均值为35.3 mm,位移值分布如图3所示。

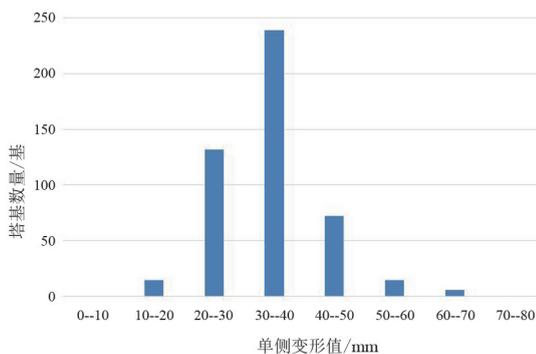


图3 曲臂K节点单侧位移值分布

由图3可见:约86.6%的塔位单侧位移小于40 mm,约12.6%的塔位单侧位移在40~60 mm,约0.8%的塔位单侧位移大于60 mm;约92.5%的单侧位移值集中在20~50 mm。

为分析猫头塔K节点变形原因,在地面进行了两种猫头塔塔头的试组装,采用卧式组装后再吊装竖直。试组装结果表明:卧式组装K节点位移值较小,甚至出现负值的情况,说明卧式组装由于螺孔间隙、安装误差、加工误差等原因会产生偏差,但是偏差值不大;吊装竖直后,受自重影响,螺栓发生滑移,螺栓与螺孔孔壁发生挤压抵紧,发出“咯吱咯吱”的

声响,K 节点向外鼓曲,单侧位移平均值在 30 mm 左右。

## 2 K 节点变形原因分析

### 2.1 设计因素

酒杯塔和猫头塔曲臂 K 节点以上部分是典型的铰拱结构,铁塔组装完成之后,在横担自重和导地线垂直荷载作用下会发生鼓曲变形,但受力特点存在差异:对于酒杯塔,中横担自重和中导线垂直荷载使得 K 节点向外鼓曲,但边横担自重和边导线垂直荷载使得 K 节点向内侧移动,如图 4 所示;对于猫头塔,中横担自重和中导线垂直荷载使得 K 节点向外鼓曲,边横担自重和边导线垂直荷载同样使得 K 节点向外侧鼓曲,如图 5 所示。

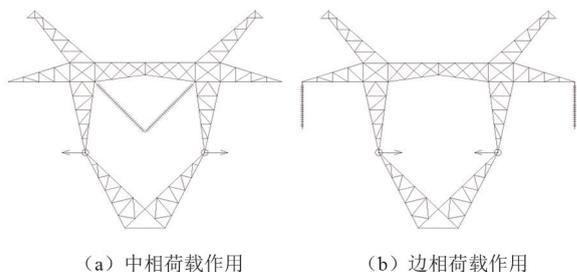


图 4 酒杯塔 K 节点位移分析

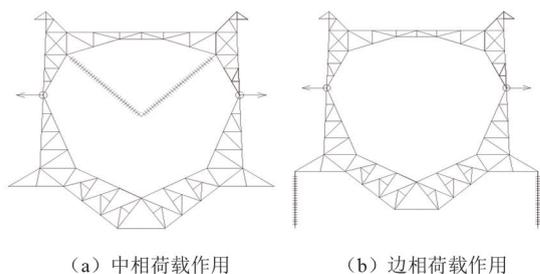


图 5 猫头塔 K 节点位移分析

因此,猫头塔曲臂 K 节点向外鼓曲变形是一种力学现象,是受力的必然反映;酒杯塔由于边导线和中导线具有相互抵消的作用,K 节点向外鼓曲变形的趋势要小一些。

为了研究猫头塔曲臂 K 节点理论变形量的大小,以 5E1Y2-ZMH 塔型为例,采用杆单元模型计算右曲臂外侧各节点的理论位移值。选择 6 个计算工况,其中:工况 1,未架线,无风;工况 2,未架线,风速为 10 m/s;工况 3,已架线,风速为 10 m/s;工况 4,已架线,大风,最大垂直荷载;工况 5,已架线,大风,最小垂直荷载;工况 6,已架线,覆冰,最大垂直荷

载。计算结果如图 6 所示。

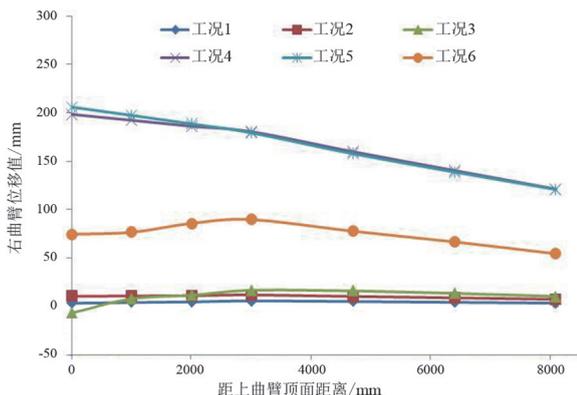


图 6 典型工况下猫头塔曲臂位移值

从图 6 中数据可以看出:

1) 上曲臂各点沿横担方向的位移值(绝对位移)在大风工况下较大,其次是覆冰工况,在安装和未架线工况下较小。

2) 在各工况下,上曲臂各点的变形并不相同。以曲臂 K 节点为界,变形曲线基本呈双折线模式,在曲臂 K 节点处出现拐点,即外鼓变形。这和现场观察到的现象基本一致。说明 K 节点作为刚度上的薄弱点,在正常加工和施工情况下,其受力时的变形现象为外鼓变形。

3) K 节点的相对变形值与导地线垂直荷载关系较大。垂直档距越大,垂直荷载越大,理论计算变形值也相对越大。

4) 在各工况下,K 节点相对外曲臂上下端点的理论变形值较小。架线前的相对变形约为杆件全长的 1/3000,架线后约为杆件全长的 1/500,大风情况下约为杆件全长的 1/750,覆冰情况下约为杆件全长的 1/350。

为了探讨 K 节点位移对附近杆件受力的影响,假定猫头塔未强行组装,K 节点位移主要为螺栓滑移变形,不会产生附加内力。因此,在正常加工和组装的前提下,可仅考虑 K 节点坐标、尺寸变化对构件承载力的影响。以 5E1Y1-ZMH1 为例,对 K 节点位移后的内外曲臂主材进行受力分析,如图 7 所示。

由图 7 可知,在不考虑附加内力的前提下,K 节点向外位移会导致上曲臂内主材、上下曲臂外主材内力增加,单侧位移达到 80 mm 时上曲臂内主材内力增加 11%。

### 2.2 加工因素

放样尺寸误差、螺孔间隙、塔材的初弯曲以及瓶口、曲臂、曲板角度等加工因素,均对 K 节点的位移

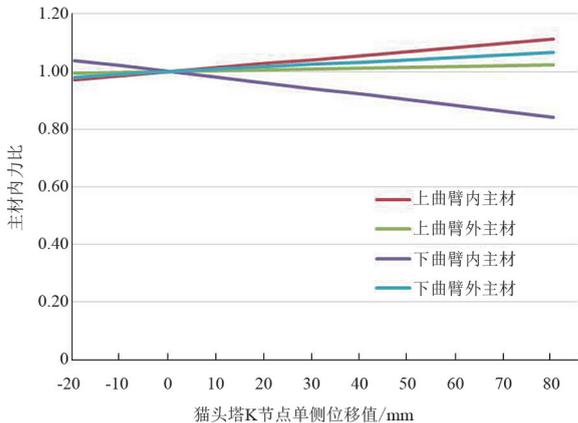


图7 K节点位移对主材内力影响

有一定影响。

由于输电铁塔全部采用粗制螺栓,螺栓孔比螺栓公称直径一般大 1.5~2.0 mm。而实际加工制造时,孔径往往还要偏大,而螺栓实际直径往往比公称直径偏小,这样会进一步加大相关节点的位移。

由于螺栓与螺孔之间的间隙,会造成最大构造间隙为  $2e$  ( $e$  为螺孔与螺杆直径的差值),如图 8 所示。

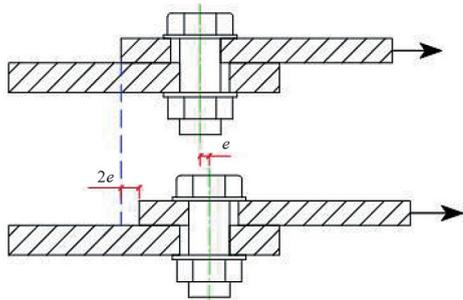


图8 螺栓滑移

根据现场测量数据,螺孔直径平均比螺栓公称直径大 2.17 mm,单个螺栓间隙滑移最大值达 4.34 mm。螺栓与螺孔之间的间隙引起的累积位移往往不可忽略,对 K 节点处位移影响较大。

### 2.3 施工因素

施工工艺、施工方法和施工习惯,也会对曲臂 K 节点的位移产生影响。从各施工标段提供的数据可以看出,不同标段单侧位移平均值的离散性较大,这说明了位移大小和施工队伍、施工工艺关系较大,良好的施工工艺和组织管理可有效控制曲臂 K 节点相对位移。

在塔头组装时,由于上部未闭合,若未对左右两侧 K 节点进行位移限制,下曲臂和塔身形成一个开口式 Y 型结构,在自重作用下会产生一定位移,如图 9 所示。

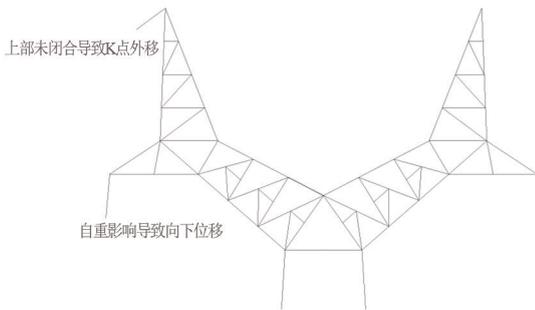


图9 塔头组装

为了验证施工因素对 K 节点的影响,对云南某工程 AN145 塔位铁塔组立过程进行了监测。施工采用内悬浮内拉线方法,组装塔头部位时内拉线打在塔身杆件上,不对塔头杆件施加外荷载,现场组立如图 10 所示。

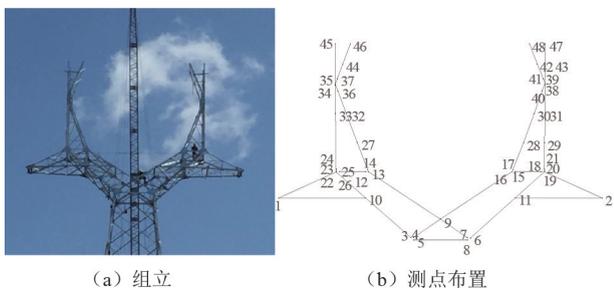


图10 AN145 塔位现场组立监测

对塔头部位控制点的坐标进行测量,将测量数据投影到竖直面上,通过与下曲臂上平面主材交点(见图 10 中测点 9)的相对位置关系,研究塔头各点的位移情况,测量数据见表 2、表 3。

表2 垂直位移测量数据

	位置	测点号	Z 实测值/mm	Z 设计值/mm	Z 差值/mm
左侧	K 节点下端点	23	2774	2843	-69
	K 节点	35	7713	7793	-80
	K 节点上端点	45	10 049	10 132	-83
	横担端点	1	1207	1279	-72
右侧	K 节点下端点	20	2785	2843	-58
	K 节点	39	7760	7793	-33
	K 节点上端点	47	10 056	10 132	-76
	横担端点	2	1213	1279	-66

从表 2 可以看出,各测点垂直坐标 Z 的差值均为负,表明曲臂和横担发生向下位移;从表 3 可以看出,各测点水平坐标均为正,表明曲臂和横担向外位移。这是由于塔头上部未闭合,下曲臂和塔身形成一个开口式的 Y 型结构。此时若不采取限制位移的措施,曲臂和横担在自重作用下将产生下坠,导致

K 节点向外鼓曲变形。

表 3 水平位移测量数据

位置	测点号	Z 实测值/mm	Z 设计值/mm	Z 差值/mm	
左侧	K 节点下端点	23	5696	5650	46
	K 节点	35	5744	5650	94
	K 节点上端点	45	5756	5650	106
	横担端点	1	8840	8786	54
右侧	K 节点下端点	20	5692	5650	42
	K 节点	39	5704	5650	54
	K 节点上端点	47	5705	5650	55
	横担端点	2	8844	8786	58

如果不对曲臂和横担的下坠进行纠正就组装顶部的水平横担,则需将 K 节点上部左右塔材强行拉近才能组装到位。然而,K 节点刚度相对塔头其他部位较弱,会使得 K 节点主材向外鼓曲,如图 11 所示。

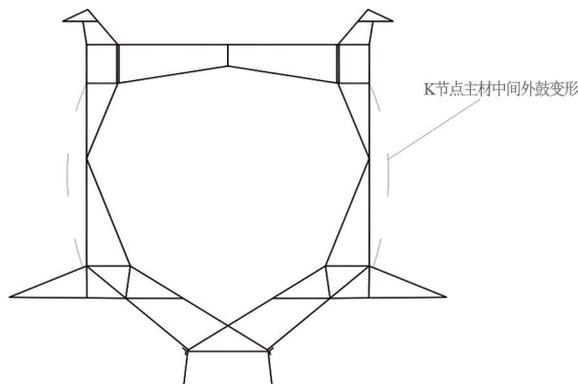


图 11 猫头塔 K 节点变形

## 2.4 K 节点变形原因小结

通过上述分析可知,曲臂 K 节点向外鼓曲是一种力学现象,经计算,常规 500 kV 猫头塔曲臂 K 节点架线前的理论相对位移约为 2~3 mm,架线后的理论相对位移约为 3~15 mm,理论变形值相对较小。

从典型铁塔组立结果可以看出,施工方法对 K 节点位移影响较大,如果强制组装不对曲臂和横担的下坠进行纠正,将加大鼓曲变形。

因此,K 节点位移主要受施工因素影响,其次为加工因素,再次为设计因素。

## 3 K 节点变形控制措施

从上述分析结果可以看出,角钢塔曲臂 K 节点

变形是无法彻底避免的客观现象,只能通过采取控制措施减小变形的不利影响。通过有针对性的研究发现,除适当提高铁塔加工精度减小初始变形外,还建议在设计和施工中采取以下措施控制 K 节点的变形。

### 3.1 设计措施

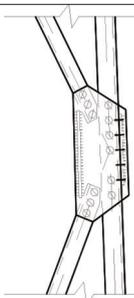
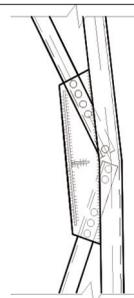
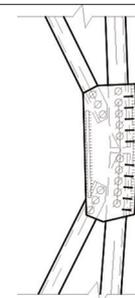
1) 由于酒杯塔中横担和边横担垂直荷载引起的 K 节点变形具有相互抵消的效果,因此在走廊条件允许的情况下,优先采用受力性能更好的酒杯塔。

2) GB 50017—2017《钢结构设计规范》<sup>[6]</sup>要求压杆初弯曲不能超过杆长的 1/1000, GB 50233—2014《110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范》<sup>[7]</sup>中规定铁塔组立后,各相邻主材节点间弯曲度不得超过 1/750。这是因为轴心受力杆件的初弯曲会引起 P-Δ 效应,严重降低压杆的极限承载力;但 K 节点是一个节点,它的横向位移并不等同于轴心受力杆件的初弯曲,因此不会引起 P-Δ 效应,也就不会降低压杆的极限承载力<sup>[4]</sup>。猫头塔外曲臂主材一般长度不大,以往多采用通长杆件,在工程实践中有的质检单位会采用各相邻主材节点间弯曲度不得超过 1/750 的标准来判断,对工程的验收造成了一定的困难。因此,曲臂 K 节点外主材不宜采用通长杆件,建议开断处理,回避前述验收规定。

此外,曲臂 K 节点外主材不宜设计为直线,建议采用折线设计,降低 K 节点变形后的视觉误差效果。

曲臂 K 节点外主材常见处理方式及推荐方案见表 4。

表 4 曲臂 K 节点外主材方案对比

对比项	方案 1	方案 2	方案 3
结构			
特点	外主材通长(直线)	外主材通长(火曲)	外主材开断(折线)
是否推荐	不推荐	不推荐	推荐

3) K 节点处内外曲臂主材夹角不宜太小,建议不小于 18°,以确保 K 节点处具有良好的刚度,如图 12 所示。

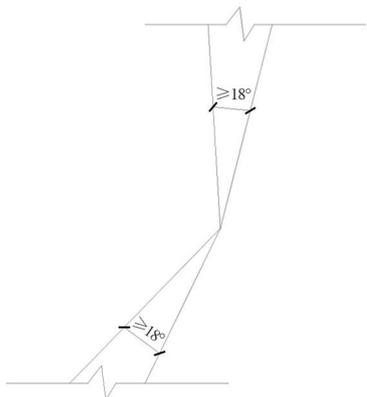


图 12 K 节点处内外曲臂主材夹角控制

4) K 节点发生位移难免会对节点附近的杆件产生附加应力,建议对上下曲臂主材和正侧面节点板加大一级。

### 3.2 施工措施

1) 施工单位在塔头组装时,应严格按照设计要求在边横担内侧节点及曲臂 K 节点设置对拉钢绳,对曲臂和横担的下坠进行纠正,控制组塔期间的变形,如图 13 所示。

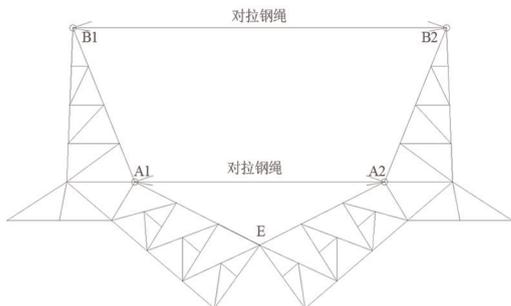


图 13 施工孔及拉线布置

2) 架线完成后应复核 K 节点变形情况,变形较大时,应先松开 K 节点(B1、B2)及边横担内侧节点(A1、A2)连接螺栓,通过对拉钢绳调整到设计值后再紧固螺栓,如图 14 所示。

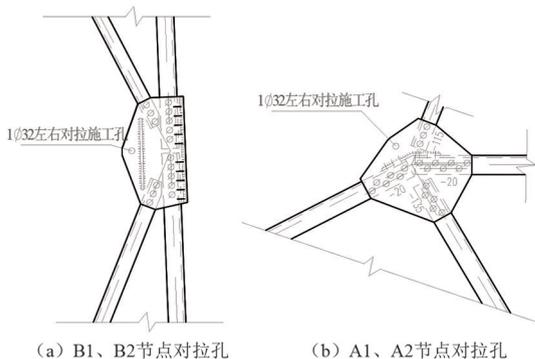


图 14 对拉施工孔

### 3.3 试组装及工程检验

在后续云南某新建 500 kV 交流输电线路工程

中,对猫头塔采取了以下控制措施:

- 1) 曲臂 K 节点外主材设计为折线,并进行开断;
- 2) 上曲臂内主材与外主材夹角按 25°设计,下曲臂内主材与外主材夹角按 23°设计;
- 3) 上下曲臂主材和正侧面节点板规格见表 5;

表 5 曲臂主材和节点板规格

部位	计算规格	加大后规格
上曲臂内主材	L80×7H	L90×7H
上曲臂外主材	L110×8H	L110×10H
下曲臂内主材	L90×7H	L100×7H
下曲臂外主材	L110×8H	L110×10H
正面节点板厚度	10 mm	12 mm
侧面节点板厚度	10 mm	12 mm

4) 在 K 节点及边横担内侧节点设置左右对拉施工孔,在铁塔组立过程中设置对拉钢绳,控制曲臂和横担的下坠以及 K 节点的变形。

对采取了上述控制措施的猫头塔在塔厂进行了立式试装,如图 15 所示。然后进行了现场实测验证,实测数据如表 6 所示。



图 15 猫头塔立式试组装现场

表 6 K 节点位移实测数据

检验次序	检验时间	左右 K 节点水平距离变化	检验结果
第 1 次 (组立完成)	2020-12-24 17:00	无变化	满足
第 2 次 (静置 17 h)	2020-12-25 10:00	增加 1 mm	满足
第 3 次 (静置 42 h)	2020-12-26 11:00	无变化	满足

实测数据表明,K 节点位移值在 0~1 mm 之间,肉眼基本无法看出明显的变形,试验塔满足验收要求。

## 4 结论

上面以某 500 kV 交流输电线路工程猫头塔曲臂 K 节点变形统计情况为基础,从设计、加工、施工

三方面对曲臂 K 节点变形进行深入分析后认为,角钢塔曲臂 K 节点变形是一种正常的力学现象,是受力的必然反映,不能彻底避免,且受加工精度和施工方法影响较大。在设计和施工中建议采取以下措施控制 K 节点的变形:

1) 在走廊条件允许的情况下,优先采用受力性能更好的酒杯塔;

2) 曲臂 K 节点外主材不宜采用通长杆件,建议开断处理;

3) K 节点处内外曲臂主材夹角不宜太小,建议不小于  $18^\circ$ ;

4) 在受力计算结果的基础上,对上下曲臂主材和正侧面节点板加大一级;

5) 塔头组装时,在边横担内侧节点及曲臂 K 节点设置对拉钢绳,对曲臂和横担的下坠进行纠正,控制组塔期间的变形;

6) 架线完成后应复核 K 节点变形情况,变形较大时,通过对拉钢绳调整到设计值后再紧固螺栓。

塔头立式组装和工程实践结果表明,采取了所设计的构造措施并规范施工工艺后,曲臂 K 节点在组塔阶段的变形值接近 0,架线后也无明显变形,控制措施效果显著,值得在今后的铁塔设计、施工中借鉴采用。

(上接第 60 页)

采取简化接线后,串抗站内仅有部分视频监控、照明及检修负荷。这些负荷即使长时间停电也不影响串抗站的正常运行,因此采用简化接线的独立串抗站站用电源可采用 1 回外接电源进行供电。

### 3.5 接地

采取简化接线后的 500 kV 独立串抗站接地方案与常规串抗站也有较大不同。采用简化接线后,站内没有重要的二次及通信设备,仅需满足站内人员安全即可。也就是说,采用简化接线后的 500 kV 独立串抗站接地主要是满足接触电势和跨步电势要求,对串抗站的目标接地电阻值的要求可适当降低。

干式空芯电抗器漏磁较严重,根据调研,已建串抗站多有地网发热的情况发生。因此,串抗站主地网建议采用非铁磁性的扁铜作为主网接地材料。

## 4 结 论

布置于线路中部的 500 kV 独立串抗站与紧邻

## 参考文献

- [1] 500 kV 平武线送电线路工程 ZJ10 直线小转角塔试验报告[R].武汉:电力工业部中南电力设计院,1980.
- [2] 国网北京电力建设研究院.1000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程 ZMP2 猫头塔 K 节点位移真型试验验证报告[R].北京:国网北京电力建设研究院,2008.
- [3] 吴庆华,冯德奎.输电铁塔曲臂‘K’节点位移研究[J].电力勘测设计,2010(3):52-55.
- [4] 冯德奎,舒爱强,包永忠.特高压输电塔曲臂变形分析[J].电力建设,2010,31(5):13-16.
- [5] 李强,吴庆华,徐志军.输电铁塔 K 节点变形的数理统计分析[J].华中科技大学学报(城市科学版),2010,27(1):89-92.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [7] 中国电力企业联合会.110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范:GB 50233—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.

### 作者简介:

辜良雨(1979),男,工学学士,高级工程师,主要研究方向为输电线路结构设计。

(收稿日期:2021-10-29)

变电站布置的串抗站相比,面临监控信号远传难度大、需设置独立站用辅助系统、设备运行维护困难等难题。如果按照常规 500 kV 串抗站的原则去设计,不但投资增加较大,后期运行维护工作量也会随之增大。若在确保主要功能的前提下,将串联电抗器视为线路的一部分,则可尽量简化接线型式及设计方案,可以大幅节省投资并减轻后期运维难度。

## 参考文献

- [1] 薛敏,卢波,黄华,等.首台 500 kV 线路串联电抗器在华东电网的应用研究[J].华东电力,2008,36(11):47-50.
- [2] 祝瑞金,蒋跃强,杨增辉,等.串联电抗器限流技术的应用研究[J].华东电力,2005,33(5):18-22.
- [3] 王一,单金华,张淦锋,等.HGIS 限流串联电抗器对线路过电压的影响分析[J].浙江电力,2020,39(7):13-17.

### 作者简介:

曹尹(1982),男,高级工程师,从事变电站电气一次设计工作。

(收稿日期:2021-10-08)

# 新型锚杆基础破坏机理及影响因素研究

鄢秀庆,辜良雨,余国庆,董碧霞,王伸富,王波

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川成都 610021)

**摘要:**为克服锚杆基础在山区输电线路中应用的局限,文中提出了一种由自由段和锚固段组成的新型锚杆基础,通过有限元数值方法研究了新型锚杆的应力分布及失效机理,并对黏结强度、锚杆长度、岩石类型及孔杆直径比等因素进行了参数分析。研究表明:注浆体与岩石及锚筋与注浆体之间,其黏结应力的分布范围只在锚固段靠近张拉端的有限长度上且应力分布极不均匀;黏结强度是判断锚杆失效界面类型的重要参数指标,对承载力有较大影响;锚固长度存在峰值,破坏面发生在注浆体和岩石界面时,硬岩承载力明显高于软岩承载力;锚孔直径/锚杆直径的最佳比例为4~5倍。

**关键词:**新型锚杆基础;有限元分析;影响因素研究

**中图分类号:**TU 443 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)03-73-07

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220313

## Research on Failure Mechanism and Influencing Factors of New Type Anchor Foundation

YAN Xiuqing, GU Liangyu, YU Guoqing, DONG Bixia, WANG Shenfu, WANG Bo  
(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering  
Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to overcome the application limitation of anchor foundation in mountainous transmission lines, a new type of anchor foundation composed of free section and anchored section is proposed. The stress distribution and failure mechanism of the new anchor are studied by finite element numerical method, and the factors such as bond strength, anchor length, rock type and hole-rod diameter ratio are analyzed. The results show that: the distribution range of bond stress between grouting and rock and between anchor bar and grouting is only in the limited length of anchored section near the tension end, and the distribution of stress is extremely uneven; the bond strength is an important parameter to judge the failure interface type of anchor rod, and has a great impact on the bearing capacity; there is a critical value of the anchorage length, and the failure surface occurs at the interface between grouting and rock, the bearing capacity of hard rock is obviously higher than that of soft rock, and the optimal ratio of hole diameter to bolt diameter is 4~5 times.

**Key words:** new type anchor foundation; finite element analysis; influencing factor research

## 0 引言

现阶段山区输电线路基础主要采用的挖孔桩基础,由于成孔设备重,基坑开挖机械化程度非常低,而人工开挖速度慢且安全性也较差,在部分省区已被列入严格限制使用的范畴<sup>[1-3]</sup>。山区机械化施工较为便利的基础为岩石锚杆基础,但其对地形坡度、覆盖层厚度、岩石风化程度和完整性要求较高,在山区输电线路中的应用受限,适用性相对较差<sup>[4-8]</sup>。

为了克服挖孔桩基础及锚杆基础应用的局限性,在输电线路领域提出了新型锚杆基础方案。新型锚杆基础主要有基础承台和预应力锚杆组成<sup>[9-10]</sup>,下压力主要由承台传递,上拔力由锚杆承担。锚杆分自由段和锚固段,自由段布置在表层土层及风化层,锚固段布置在中风化岩层。通过自由段的设置,一方面可以穿透表层松散层,将力传递给锚固段;另一方面,锚杆张拉时,通过自由段的弹性变形对基础施加预应力。通过预应力的施加,可向

承台下土体施加压力,可以提高基础的整体承载力能力及锚杆的抗腐蚀性能力,具有较好的经济效益和社会效益。

## 1 传力机理

新型锚杆基础如图 1 所示。

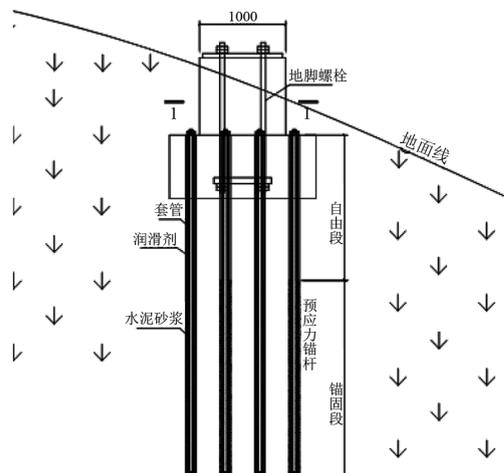


图 1 新型锚杆基础

新型锚杆基础的上拔力主要通过锚杆进行传递,受力过程较为复杂,因此下面主要研究上拔力的传递。上拔荷载通过锚固段传递给地基,锚固段的承载力取决于锚杆与注浆体、注浆体与岩石两个界面的黏结能力。

### 1.1 应力分布

锚杆基础的荷载应力状态是其力学性能研究的基础,这里采用弹性半无限体明德林(Mindlin)解来表示岩体的应力及位移分布,文献[11]基于此弹性解对注浆体与岩石界面的应力分布、锚杆与注浆体界面的应力分布进行了推导,注浆体-岩石界面上的黏结应力  $t_{gr}(z)$  沿轴向的分布方程为

$$t_{gr}(z) = \frac{nA_0}{C_b} z e^{(-\frac{n}{2}z^2)} \quad (1)$$

其中:

$$C_b = 2\pi R_b \quad (2)$$

$$n = \frac{1}{(1 + u_r)(3 - 2u_r)R_b^2} \left( \frac{E_r}{E_{ag}} \right) \quad (3)$$

$$E_{ag} = \frac{E_a A_a + E_g A_g}{A_a + A_g} \quad (4)$$

式中:  $A_0$  为张拉端所施加的轴向拉拔荷载, kN;  $z$  为锚固长度, mm;  $n$  为注浆体岩石界面的综合刚度系数;

$u_r$  为岩体的泊松比;  $E_r$  为岩体的弹性模量;  $R_b$  为锚孔半径;  $C_b$  为锚孔周长;  $E_{ag}$  为锚固体的当量弹性模量;  $E_a$  为锚筋的弹性模量;  $E_g$  为注浆体的弹性模量;  $A_a$  为钢筋横截面积;  $A_g$  注浆体横截面积。

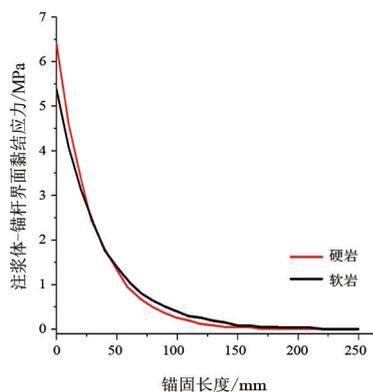
注浆体-锚杆黏结应力沿轴向的分布方程为

$$A_{ag}(z) = A_0 e^{(-\frac{n}{2}z^2)} \quad (5)$$

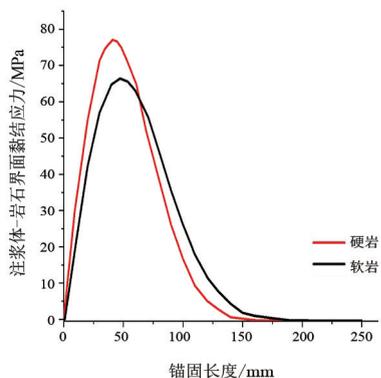
根据上述推导公式,对软质岩石、硬质岩石在上拔力作用下的应力分布进行计算,锚杆、岩石及注浆体力学指标见表 1,得到的界面黏结应力分布见图 2。

表 1 岩石及锚杆、注浆体力学指标

物体	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
软岩	1.66	52	3300	0.15
硬岩	2.68	52	4440	0.1
物体	$R_c$ 直径/mm	面积/mm <sup>2</sup>	弹性模量/GPa	密度/(g·mm <sup>-3</sup> )
锚杆	24	452.2	200	7.85
物体	抗压强度/MPa	抗拉强/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
注浆体	14.3	1.43	30	0.2



(a) 注浆体-锚杆界面



(b) 注浆体-岩石界面

图 2 界面黏结应力分布

由图 2 中的界面黏结应力分布曲线可知:两种黏结应力分布是不均匀的,且在靠近锚固段的张拉端侧黏结应力高度集中,黏结应力的分布范围只在

锚固段靠近张拉端的有限长度上;目前的锚杆基础设计计算中黏结应力沿全长分布的假定与实际情况不符。

## 1.2 破坏机理

在清楚两个界面的应力分布后,即可分析其破坏机理。锚杆基础一般有两种破坏机理:1)注浆体-锚杆界面破坏;2)注浆体-岩石界面破坏。图3是两种界面的破坏本构关系。

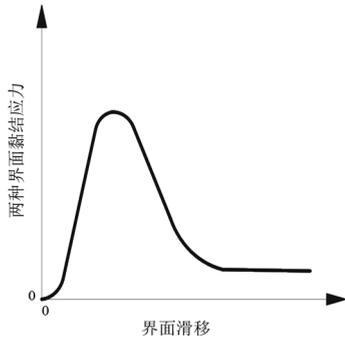


图3 界面黏结应力-滑移曲线

当发生注浆体-锚杆界面破坏时,在外荷载超过一定值时,孔口处的注浆体-锚杆界面黏结应力首先超过注浆体的弹性极限而进入塑性流动状态,界面发生脱黏破坏,锚杆与注浆体黏结应力的峰值沿着张拉端向内锚固段末端传递,并以渐进的方式发生滑动改变黏结应力的分布,最终导致钢绞线从注浆体中旋转拔出,遭到破坏。

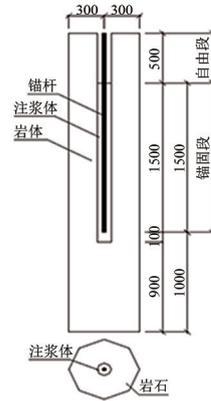
发生注浆体-锚杆界面破坏,其本质是注浆体和岩石剪切破坏。如图3所示,界面黏结强度从弹性阶段到达屈服极限,然后注浆体-岩石黏结界面沿主要糙度起伏齿爬坡,在黏聚力、摩擦力及剪胀效应共同作用下,抗剪强度达到最大值。峰值点过后,剪切应力随应变呈下凹型曲线下降,黏聚力丧失,当抗剪强度逐渐降低至某一点后,达到残余强度,注浆体-岩石黏结界面已经发生剪破断裂。

## 2 数值分析

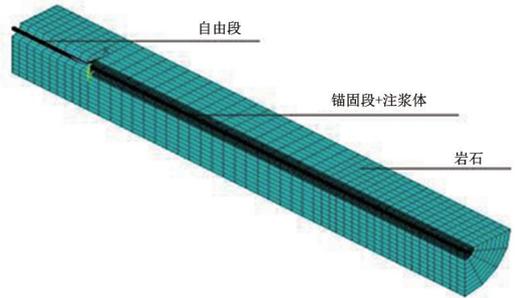
### 2.1 破坏机理分析

由第1章可知,锚杆基础的失效主要可以分为注浆体-锚杆界面的脱落破坏失效和注浆体-岩石粘结界面的剪切破坏两类。而两种破坏发生的条件并不一致,这里采用ANSYS软件进行锚固桩失效机理数值模拟分析。根据昆柳龙直流工程的工程实践,首先建立1/4实体模型,锚杆直径 $R_c$ 为30 mm,

注浆孔直径为120 mm,自由段长度(未与注浆体接触)为500 mm,锚固段长度为1500 mm,注浆孔长度为1600 mm,岩体总长度为2500 mm,如图4所示。钢筋和岩石采用solid45单元,注浆体采用solid65单元。在对称面上施加对称约束,底面施加竖向约束,外弧面所有自由度均予以约束,在自由段顶面施加拉拔荷载。



(a) 几何模型



(b) 有限元模型

图4 结构几何示意及有限元模型

锚杆采用双线性随动强化 BINK 模型,注浆体采用多线性随动强化 MISO 模型,岩体采用 Druker-Prager 模型作为本构关系。3种材料之间的接触关系采用目标单元 TARGE170 和接触面单元 CONTA173 来模拟锚杆与注浆体、注浆体与岩石的接触面,法向刚度因子取值4,切向刚度取默认值,根据表1中3种材料的特性和文献[12]中的试验数据,接触参数取值见表2。

表2 接触单元参数

接触面	摩擦系数	黏聚力/MPa
锚杆与注浆体	0.40	0.8
注浆体与硬质岩石	0.65	0.3
注浆体与软质岩石	0.45	0.2

在锚杆上施加105 MPa的荷载进行应力计算

分析。锚杆、注浆体及岩石的应力云图见图 5,两个界面应力分布见图 6。

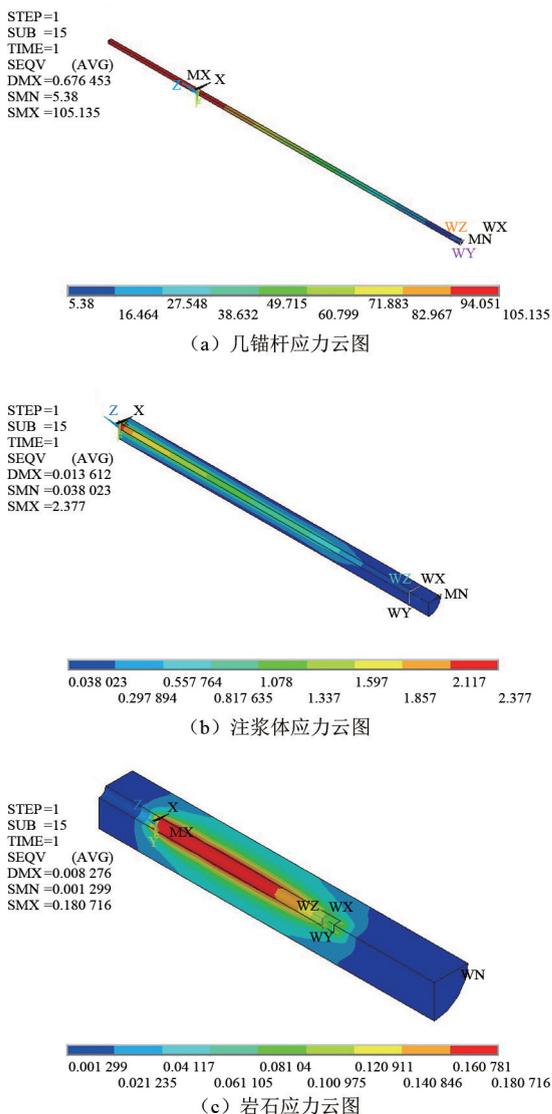


图 5 数值分析界面黏结应力分布

由图 5 可知,锚杆自由段和锚固段的应力分布截然不同,自由段无应力传递,应力分布基本相同;进入注浆体后,随着埋深的增加,应力逐渐扩散,其应力分布表现为上大下小的规律,到锚杆端部逐渐降为 0。注浆体的应力分布表现为:注浆体的位移影响区随着外荷载的增加在逐渐扩散,且从上到下逐渐减小。

由图 6 可知,两个破坏界面的最大应力为 2.226 MPa,处于锚杆与注浆体的接触界面的端部,已经超过了其界面的黏聚力要求,达到屈服值;而注浆体-岩石界面的最大应力为 0.172 MPa,未达到屈服值,因此,锚杆基础的破坏首先发生在注浆体-锚杆界面。随着外荷载的增加,注浆体受拉屈服

的区段不断增加,并逐渐退出工作,应力分布发生了由表及里的转移,影响区域在逐渐扩散。同样,两个界面的相对位移量也说明了锚固桩的破坏形态,锚固段端点位移为 0.38 mm,注浆体的最大位移为 0.017 mm,岩石端最大位移仅为 0.008 mm。数值模拟的应力分布和破坏机理也和第 1 章中的描述相印证,说明了数值模拟的合理性。

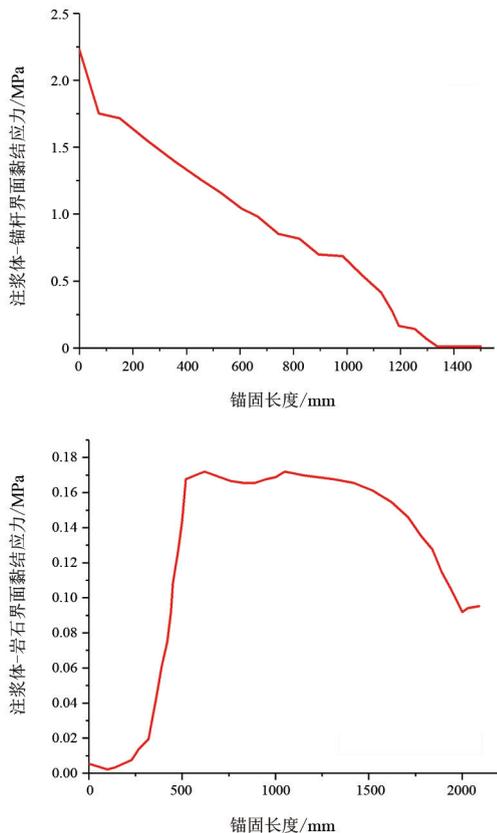


图 6 数值分析界面黏结应力分布

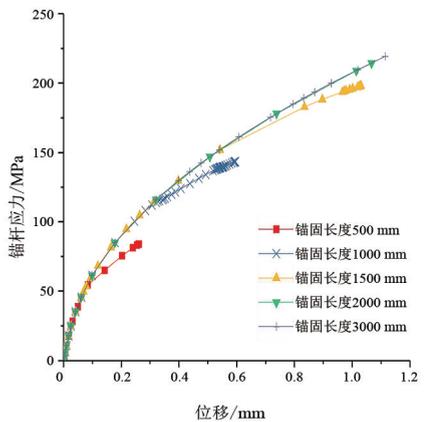
因此,两种界面的黏结强度是判断其破坏形态的重要指标;当注浆体-岩石界面的黏结强度较大时,会首先发生注浆体-锚杆界面屈服失效而导致的第一类破坏,即锚杆与注浆体黏结面的脱黏破坏,这也是岩石锚杆基础的主要失效模式;当注浆体-锚杆界面黏结强度较大时,破坏面会转移到注浆体-岩石界面,使其首先屈服失效。

## 2.2 参数分析

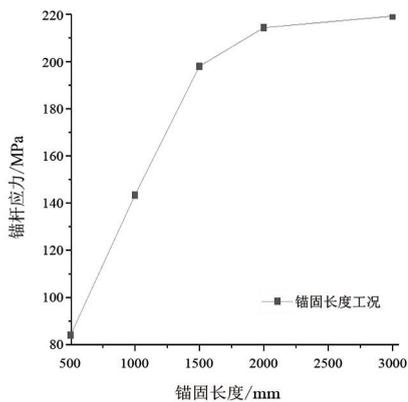
由第 2.1 节可知,锚固桩的破坏是由于锚杆与注浆体之间发生了较大的位移错动,最终导致了界面的黏结破坏。为了分析不同参数对锚固性能的影响,根据锚固桩的受力特性和使用环境,将考虑黏结强度、锚杆长度、孔杆直径比和岩石类型等 4 种因素对锚固性能的影响。

### 2.2.1 锚固长度的影响

在工程设计中,锚固长度小于有效锚固段长度时(工程中一般为35倍直径),增加锚杆锚固长度可有效提高抗拔能力<sup>[13-14]</sup>。这里锚固长度分别取500 mm、1000 mm、1500 mm、2000 mm、3000 mm进行计算,结果如图7所示。



(a) 不同锚固长度下的荷载位移曲线



(b) 不同锚固长度对承载力的影响

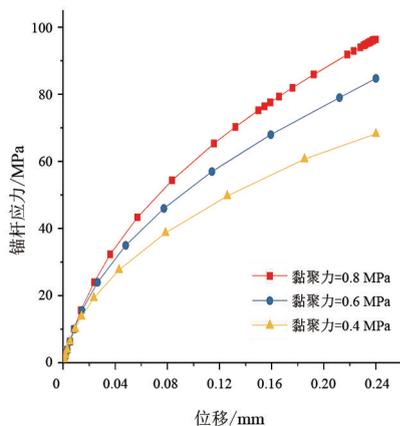
图7 锚固长度参数分析

由图7可知,锚杆应力在500~1500 mm锚固长度内基本呈线性增长,在锚固长度为2000~3000 mm时增长趋势趋缓,进入平台阶段。由此可知,当锚固长度在某一有效范围内时,增加其长度可有效提高承载力;但当锚固长度大于某一临界值时,随着长度的增加,对承载力的提高效果将大大降低。这主要是由于黏结应力沿锚杆轴向呈不均匀分布导致的。此外,当黏结应力达到极限值时出现应力分布向锚杆底部转移。因此,在相同的外荷载下,锚固长度越长,其发生的位移则越小。

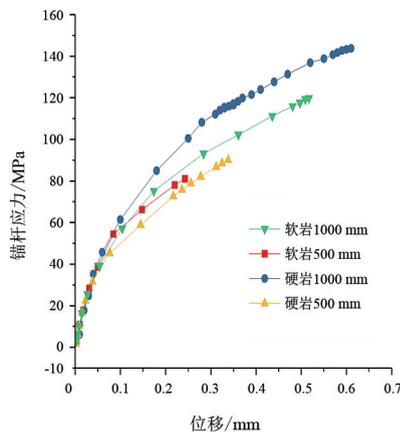
### 2.2.2 黏聚力的影响

为研究黏结强度对承载力的影响设计0.4 MPa、

0.6 MPa、0.8 MPa 3种黏聚力工况进行分析比较。图8(a)为不同黏结强度下的荷载位移曲线,由图可知,黏结强度和承载力正相关,随着黏聚力的增加,锚杆的上拔承载力明显提高。当位移为0.24 mm时,0.6 MPa与0.8 MPa两种工况的承载力分别是0.4 MPa时的1.24倍和1.41倍。同时,黏聚力的增加也会导致破坏面向注浆体-岩石界面转移。此外,横向比较来看,随着黏聚力的增加,接触面抵抗变形的能力明显加强,相同承载力的情况下,0.8 MPa时变形仅为0.4 MPa时的50%左右。



(a) 不同黏结强度下的荷载位移曲线



(b) 不同岩石类型工况的荷载位移曲线

图8 黏结强度及岩石类型参数分析

### 2.2.3 岩石类型的影响

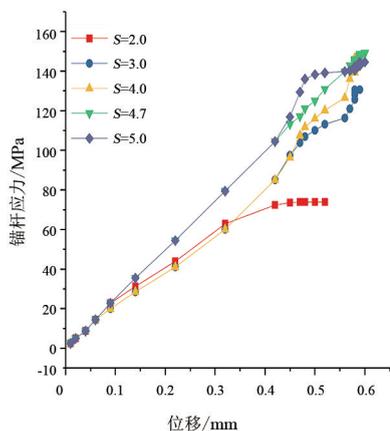
一般情况下破坏首先发生在锚杆-注浆体界面,改变岩石类型对上拔承载力无影响,随着黏结强度的增加,破坏面转移到注浆体-岩石界面时,岩石类型对承载力才会发生明显影响。为研究软质岩石和硬质岩石对上拔承载力的影响,将锚杆与注浆体黏结强度设为1.5 MPa,确保黏结破坏发生在注浆体-岩石界面。分别建立锚固长度 $l$ 为500 mm和1000 mm两种模型,计算结果见图8(b)。锚固长度

$l$  为 500 mm 时,硬岩的上拔承载力较软岩提高 11%;锚固长度  $l$  为 1000 mm 时,硬岩的上拔承载力较软岩提高 20%。可见,当黏结破坏发生在注浆体和岩石界面时,锚入硬质岩石的承载力较软质岩石可提高 10%~20%,且随着锚固长度的增加,上拔承载力增加的趋势更加明显,这是因为硬岩的黏聚力更强。

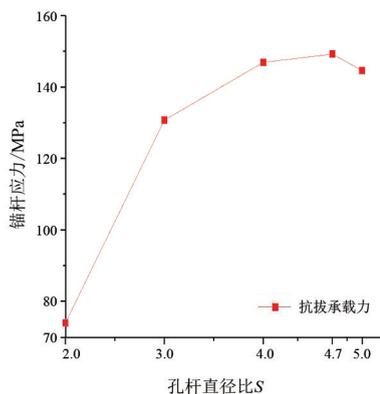
#### 2.2.4 孔杆直径比的影响

同样,孔杆直径比也是锚固桩设计的重要参数。

为分析最佳锚孔/锚杆直径比,通过建立不同的锚孔直径模型,设置孔杆直径比  $S(S=R_b/R_c)$  分别为 2.0、3.0、4.0、4.7、5.0 的 5 种工况进行比较(锚杆直径为 30 mm)。荷载位移曲线及承载力分布结果见图 9。



(a) 不同孔杆直径比下的荷载位移曲线



(b) 承载力分布

图 9 孔杆直径比参数分析

图 9(a) 表明了不同孔杆直径比下的荷载位移曲线,该曲线说明在位移较小的弹性阶段,孔杆直径比的影响不大,随着位移的增大,孔杆直径比的影响增大。由图 9(b) 可知,随着  $S$  的增大,上拔承载力分布曲线先增大后进入平台阶段不再增大,甚至略有降低,存在最佳孔杆直径比。根据上面分析,

进入平台阶段主要是由于锚孔直径被削弱导致。因此,根据分析结果,推荐锚孔/锚杆直径的最佳比例为 4.7 倍。

### 3 结论

上面提出了一种新型锚杆基础的设计方法,以满足山区输电线路基础设计的需求。通过有限元软件进行破坏机理数值模拟,验证了数值方法的正确性,并对黏结强度、锚杆长度、岩石类型以及孔杆直径比等参数进行分析,得到以下结论:

1) 理论与模拟结构表明,黏结应力的分布范围只在锚固段靠张拉端的有限长度上,目前锚杆基础设计中假定黏结应力沿全长分布与实际情况不符。

2) 黏聚力强度是判断锚固桩破坏机理的重要指标,通常破坏首先发生在锚杆与注浆体界面。当该界面黏聚力较大时,破坏界面会转移到注浆体与岩石界面。且黏聚力的大小与锚杆基础承载力正相关。

3) 在一定范围内,锚固长度的增长能有效提高锚固桩的承载力。在所设计工况中,锚固长度取 2000 mm 时到达平台阶段。

4) 当破坏面发生在注浆体与岩石界面时,岩石类型对承载力有明显影响,硬岩基础承载力较软岩基础可提高 10%~20%。

5) 随着孔杆直径比的增加,上拔承载力分布曲线有明显峰值,所设计工况最佳孔杆直径比为 4.7。

#### 参考文献

- [1] 能源行业电网设计标准技术委员会. 架空输电线路基础设计技术规程: DL/T 5219—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [2] 崔强, 张学礼, 鲁先龙, 等. 岩石地基中不同结构形式挖孔基础抗拔承载特性研究[J]. 工业建筑, 2018(4): 77-83.
- [3] 费香泽, 程永锋, 苏秀成, 等. 华北地区输电线路岩石锚杆基础试验研究[J]. 电力建设, 2007, 28(1): 26-28.
- [4] 能源行业电网设计标准技术委员会. 架空输电线路锚杆基础设计规程: DL/T 5544—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [5] 宋永发. 输电线路岩石锚杆基础试验研究[J]. 岩土工程学报, 1995(4): 89-94.
- [6] 郑卫锋, 邓海骥, 何金业. 输电线路岩石锚杆基础试验研究[J]. 建筑科学, 2012(9): 57-59.

- [7] 杨海巍.输电线路岩石锚杆基础试验与破坏模式研究[D].武汉:中国地质大学,2009.
- [8] 孙长帅,杨海巍,徐光黎.岩石锚杆基础抗拔承载力计算方法探究[J].岩土力学,2009,30(增刊1):75-78.
- [9] 肖俊,李炳奇,汪小刚.预应力锚索自由段注浆对锚固力影响研究[J].科技创新导报,2013(16):65-68.
- [10] 朱宏伟.锚索自由段嵌固深度设计和确定的理论研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.
- [11] 张永兴,卢黎,饶泉宇,等.压力型锚杆力学性能模型试验研究[J].岩土力学,2010,31(7):2045-2050.

(上接第45页)

由表2可知,静电感应电压仿真结果与拟合公式计算结果最大相对误差为0.317%,平均相对误差为0.138%;电磁感应电压仿真结果与拟合公式计算结果最大相对误差为2.336%,平均相对误差为0.782%;静电感应电流仿真结果与拟合公式计算结果最大相对误差为0.564%,平均相对误差为0.337%;电磁感应电流仿真结果与拟合公式计算结果最大相对误差为1.68%,平均相对误差为0.683%。通过上述4项对比发现,拟合公式计算结果与仿真结果平均相对误差均在1%以内,吻合程度较高,验证了拟合公式的准确性,为后续工程感应电压、感应电流的简易快速估算提供了参考。

## 5 结论

通过对500 kV同塔双回输电线路感应电压、感应电流进行研究,得到以下结论:

1) 当同塔双回线路一回运行、一回停运时,在基准设定参数下,停运线路上产生的最大静电感应电压为34.23 kV,最大电磁感应电压为9.44 kV,最大静电感应电流为8.08 A,最大电磁感应电流为288.42 A。

2) 电磁感应电压和静电感应电流与线路长度近似成正比关系,电磁感应电流随线路长度增加而变小,但逐渐趋于平缓;电磁感应电压和电磁感应电流随输送功率成正比关系显著增加,静电感应电压和静电感应电流随输送功率变化较小;感应电压和感应电流均随运行电压增加而增大;土壤电阻率增大使得电磁感应电压和电磁感应电流有一定的增加,对静电感应电压和静电感应电流影响不大。

3) 感应电压、感应电流拟合公式计算结果与仿

- [12] 饶泉宇.预应力岩锚内锚固段锚固性能及荷载传递机理研究[D].重庆:重庆大学,2008.
- [13] 侯中伟,郑卫锋.特高压输电线路岩石锚杆基础选型与设计[J].电力建设,2014,35(10):64-68.
- [14] 郑卫锋,鲁先龙,程永锋,等.输电线路岩石锚杆基础工程临界锚固长度的研究[J].电力建设,2009,30(9):12-14.

作者简介:

鄢秀庆(1984),男,硕士,高级工程师,主要从事送电结构设计。

(收稿日期:2021-09-05)

真结果吻合较好,平均相对误差均在1%以内,验证了拟合公式的准确性,为后续工程感应电压、感应电流的简易快速估算提供了一定参考。

## 参考文献

- [1] 史华勃,丁理杰,彭施语,等.110 kV同塔双回线路感应电压和感应电流对人体的危害研究[J].四川电力技术,2017,40(3):52-55.
- [2] 班连庚,王晓刚,白宏坤,等.同塔架设的220 kV/500 kV输电线路感应电流与感应电压仿真分析[J].电网技术,2009,33(6):45-49.
- [3] 钟蓉.西宁一日月山750 kV同塔双回线路接地开关选择研究[J].四川电力技术,2011,34(5):54-57.
- [4] 马爱清,徐东捷,王海波,等.500 kV同塔双回输电线路下平行运行0.38 kV线路时的感应电压和感应电荷[J].高电压技术,2015,41(1):306-312.
- [5] 郑云龙,罗日成,邹明,等.330 kV同塔双回输电线路下平行运行的380 V线路感应电压电流仿真计算[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):216-222.
- [6] 刘浩军,阎国增,王少华,等.1000 kV皖南-浙北特高压交流线路静电感应电压分析[J].高电压技术,2015,41(11):3687-3693.
- [7] 龙雄峰.变电站500 kV同塔双回输电线路感应电压研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [8] 何仰赞,温增银.电力系统分析(第三版)[M].武汉:华中科技大学出版社,2001.
- [9] 潘俊文,罗日成,吴东,等.500 kV同塔双回输电线路下平行排列油气管道上的感应电压和感应电流仿真分析[J].高压电器,2017,53(10):209-214.

作者简介:

唐浩龙(1994),男,硕士,助理工程师,从事电力设计工作;

樊艳(1979),女,高级工程师,从事电力设计工作;

冯千秀(1982),女,硕士,高级工程师,从事电力设计工作;

牟婷婷(1992),女,硕士,工程师,从事电力设计工作。

(收稿日期:2021-10-30)

# 110 kV 线路钢芯铝绞线断裂分析

陈家慧,王方强,冯 杰,刘 曦

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

**摘要:**某 110 kV 输电线路钢芯铝绞线运行 22 年后断裂,导致接地距离 I 段动作跳闸,严重影响了线路的安全稳定运行。通过运行情况调查、宏观检查、扫描电镜分析、力学试验、材质分析等技术方法对导线断裂原因进行分析。结果表明,钢芯铝绞线中铝线抗拉强度偏低,表面磨损导致承载力进一步降低,在特殊气象条件下被逐渐拉断是本次故障的主要原因。针对断裂原因,提出了评估同批次导线运行安全可靠、加强同批次导线断股情况巡视、严格把控新入网导线质量的防护建议。

**关键词:**钢芯铝绞线;断裂;抗拉强度;磨损

**中图分类号:**TM 755 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2022)03-0080-03

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220314

## Fracture Failure Analysis of Aluminum Conductor Steel Reinforced in 110 kV Transmission Line

CHEN Jiahui, WANG Fangqiang, FENG Jie, LIU Xi

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** A aluminum conductor steel reinforced (ACSR) in 110 kV transmission line is broken after the operation for 22 years, which seriously affects the safe and stable operation of transmission line. The reasons of fracture failure are analyzed through running condition investigation, visual examination, scanning electronic microscopy analysis, mechanical test and material analysis. The results show that low tensile strength and surface wear of ACSR are the main reason of fracture failure. Some protection suggestions are put forward to prevent such fracture failure.

**Key words:** aluminum conductor steel reinforced; fracture; tensile strength; wear

## 0 引言

钢芯铝绞线是高压输电线路的重要组成部分,主要用作架空导线进行远距离、大功率输电,具有传输容量大、线路造价低、导电性好、机械强度高优点,在世界各地的电力输送系统得到广泛应用。因架设在室外杆塔上,钢芯铝绞线通常要经受风雨、冰雪、雷电等恶劣气象环境,易出现微动磨损、疲劳断裂、雷击断裂等问题<sup>[1-4]</sup>;还会受到周边大气环境中水分、工业污染物和盐类物质等腐蚀介质的侵蚀,产生腐蚀失效<sup>[5-6]</sup>;此外,导线状态也受导线力学性能、架设工艺等因素的

影响<sup>[7-8]</sup>。实际运行过程中导线所处环境复杂,失效事故多为几种影响因素共同作用的结果,分析失效原因对评估在役钢芯铝绞线的运行状况有重要的现实意义。

某 110 kV 线路接地距离 I 段动作跳闸,重合不成功。对此线路进行故障巡视发现 37 号塔至 38 号塔 C 相导线断线,37 号至 38 号档距 287 m,断点距离 38 号塔 25 m。所处耐张段类型为耐-直-直-耐,长度为 1007 m。导线型号为 LGJ-150/25 钢芯铝绞线,地线型号为 GJ-35,于 1997 年 6 月投运。下面以该起断裂事故为研究对象,通过运行环境调查及理化检测对钢线铝绞线断裂原因进行详细分析,并提出运维防护建议,对提高电力系统运行的经济稳定性有重要指导意义。

## 1 运行情况分析

该段线路为跨山架设,杆塔间高差大,为雷电多发区。雷电监测信息显示事故当天凌晨两点左右当地为雷雨天气,该线路多个杆塔附近存在落雷现象。其中,1时52分38号杆附近有2个落雷,雷电流为 $-15.2\text{ kA}$ ,距离3538 m,雷击时间比导线断裂时间早17 h。经查询,事故发生时线路负荷为23 MW,电流为108 A,当日最大负荷和电流分别为23.5 MW和110 A。事故发生前,线路负荷及电流波动较小,基本正常。检查发现,事故发生后该线路地线无损伤,杆塔绝缘子无闪络痕迹,运行正常。

## 2 理化检验

### 2.1 宏观分析

导线由26根直径为2.70 mm的铝线和中心7根直径为2.15 mm的镀锌钢线绞制而成,内部为两层钢线组成的钢芯,铝线分两层缠绕在钢芯外部,内层10根、外层16根。外观检查发现:断裂处铝线凌乱地散向四周,钢芯表面存在大量灰白色粉末,可能是由于部分铝线先断裂、导线层间紧密型变差,在潮湿环境中钢线表面镀锌层氧化造成的<sup>[9]</sup>;断口附近钢芯表面有较深裂纹,由腐蚀或疲劳所致;铝绞线表面有显著熔融痕迹,如图1所示。



图1 断裂导线形貌

铝绞线的断口形貌分3种,如图2(a)所示:3根铝线断口无明显变形,有烧蚀痕迹,为高温快速熔断;20根铝线断口存在明显颈缩,呈典型杯锥形,属于拉伸断裂;3根铝线断口显著收缩,且表面有磨损,由铝绞线在风阵作用下的挤压摩擦导致。

7根钢线一侧断口中有2根较平滑,有熔融特征,其余4根存在明显颈缩,属于拉伸断裂,如

图2(b)所示;另一侧7根断口均呈拉断特征,无熔融迹象。



(a) 铝线断口

(b) 钢线断口

图2 断裂导线形貌

### 2.2 扫描电镜分析

图3展示了铝线表面微观形貌,磨损区表面粗糙且有颗粒和片状剥离,能谱分析显示该区域主要成分为Al、O元素,来源于铝线表面的腐蚀产物 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。

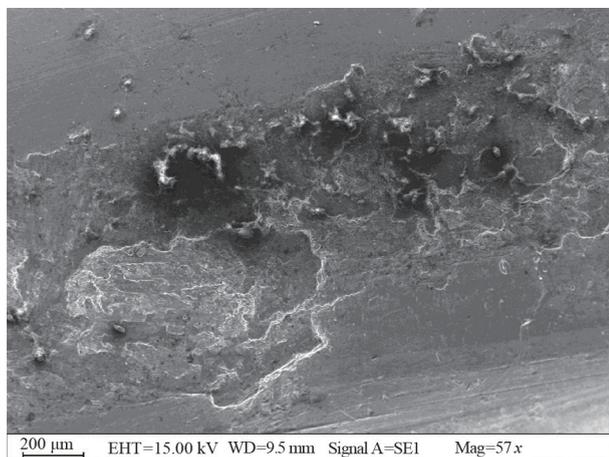


图3 铝线表面形貌

对图1中存在明显裂纹的钢芯区域进行显微观察,结果见图4。该区域没有明显颈缩现象,除了一个较大的主裂纹,该区域还存在较多平行于主裂纹的小裂纹,推断为钢线在风阵或舞动时产生的疲劳裂纹。

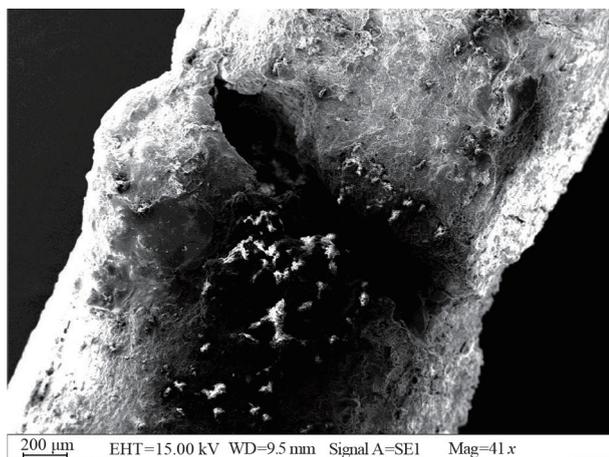


图4 存在裂纹区域的钢芯形貌

## 2.3 力学性能试验

对导线的钢单线和铝单线进行力学性能测试,结果如表 1 所示。钢单线的各项性能指标均符合 IEC 60888:1987《架空绞线用镀锌钢线》标准要求,其中抗拉强度和断后伸长率分别为 1497 MPa 和 4.9%;铝单线的分别为 150 MPa 和 5.2%,抗拉强度不满足 IEC 60889:1987《架空导线用硬拉铝线》要求的 170 MPa。

表 1 导线力学性能试验结果

材料	检测项目	实测值	标准要求	结果判定
铝单线	数量/根	26	26	符合
	直径/mm	2.70	2.70±0.03	符合
	抗拉强度/MPa	150	≥170	不符合
	断后伸长率/%	5.2		
钢单线	数量/根	7	7	符合
	直径/mm	2.15	2.10±0.05	符合
	抗拉强度/MPa	1497	≥1340(1级镀锌) ≥1240(2级镀锌)	符合
	断后伸长率/%	4.9	≥4.0	符合

## 2.4 材质分析

通过手持式 X 射线荧光光谱仪对外层铝线、内层铝线及钢线进行材质测试,结果如表 2、表 3 所示。铝单线中铝含量偏低且含有大量的 Si 及部分 P 和 S,主要来源于大气中的污染物和沙尘。镀锌钢单线表面有少量 Al 元素,由其与铝线间的摩擦产生。

表 2 铝单线材质分析结果 单位:%

部位	Al	Si	Fe	P	S	其他
外层	85.80	11.87	0.79	0.76	0.53	0.25
内层	91.14	6.43	0.47	0.32	0.64	1.00

表 3 钢单线材质分析结果 单位:%

Fe	Zn	Si	Al	Pb	其他
1.44	89.61	4.62	3.54	0.77	0.02

## 2.5 对比分析

在远离断口区域取一段导线,与断口附近导线进行对比分析(见图 5),发现正常导线内部钢芯呈银灰色,而断口附近钢芯表面存在白色粉末,主要成分是氧化锌、氢氧化锌、碳酸锌等混合物,为锌在潮湿环境中的腐蚀产物<sup>[10]</sup>,表明钢芯在断裂前已在潮湿环境中暴露较长时间。

## 3 讨论与分析

导线中有 2 根钢线有熔融痕迹,表明经历过超



图 5 断口附近导线与正常导线钢芯表面形貌对比

过碳钢熔点的高温;其余断口有明显颈缩现象,呈典型拉断特征。断口熔融痕迹有可能由高温熔断导致,也有可能是断口落地后对地放电产生。

导线高温熔断可能由工频短路电流或雷击产生。但工频短路电流作用时间长、影响范围大,不会只对少量单丝有影响,且该线路未发生短路记录。雷电产生的高温,作用范围小,可使部分单丝瞬间升温断裂<sup>[11]</sup>。输电线路架设在室外,易遭受雷击而产生停电事故。当雷电流较小时,易引起雷电绕击相导线,在绝缘子上产生闪络痕迹;当电流较大时,雷电一般不会绕击导线,而是直击架空地线或杆塔,引起反击跳闸<sup>[12]</sup>。事故发生后该线路杆塔绝缘子无闪络痕迹,地线无损伤,排除了雷电绕击导致断线的可能性。由于钢线两侧断口特征不一致,一侧均呈明显颈缩,另一侧部分显示熔融状态;因此推断钢线为拉伸断裂而非高温熔断,部分熔融断口为钢线断裂落地后形成短路接地造成。

断口附近钢线表面有显著腐蚀痕迹,表明部分外层铝线先发生断裂使绞线层间紧密度减小,加速了钢线的氧化腐蚀。力学性能测试结果显示铝单线抗拉强度偏低,铝线的挤压变形磨损会使其承载力进一步降低。铝线在大风等外界条件下易形成应力集中,出现拉伸断裂情况。随断线股数量的增加,导线有效受力面积及有效载流截面均减小,导致单线承受的应力增大且断股处发热情况加剧,剩余铝线和钢线的抗拉强度急剧减小到某一程度后被瞬间拉断。此外,钢线表面严重腐蚀或出现微裂纹会显著降低其抗拉强度,促进导线的断裂失效。结合上述分析基本可判断该起事故主要是由铝线抗拉强度偏低及层间挤压磨损造成。

(下转第 94 页)

# ±800 kV 特高压复龙换流站西门子大组件换流阀饱和电抗器缺陷分析与改造

唐世雄<sup>1</sup>, 喻悦箫<sup>2</sup>, 曹运龙<sup>1</sup>, 张鹏<sup>1</sup>, 黄宇<sup>1</sup>, 赵冉<sup>1</sup>, 刘隆晨<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司特高压直流中心, 四川 成都 610042;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** ±800 kV 复龙换流站双极四阀组换流器采用西门子技术大组件换流阀, 其饱和电抗器结构复杂、可靠性低, 运行时冷却管路极易漏水, 多次导致阀组闭锁。文中在分析西门子阀电抗器典型缺陷的基础上, 结合特高压直流输电工程实际, 设计研制了一种西门子换流阀用新型一体式饱和电抗器, 并成功应用于复龙站换流阀电抗器改造。试验结果表明: 新型饱和电抗器采用的单线圈和单管路设计, 既保持了电抗器外部电气性能、冷却水流量特性、安装结构尺寸及重量等基本不变, 还显著提高了电抗器冷却水路的可靠性, 也降低了运行振动受力及噪声水平, 可满足特高压直流工程技术与应用需要; 对于提高换流阀设备本质安全、保障直流系统能量可用率具有重要的工程价值。

**关键词:** 直流输电; 换流阀; 饱和电抗器; 漏水; 缺陷改造

中图分类号: TM 72 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2022)03-0083-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220315

## Defect Analysis and Modification of Saturable Reactor in Siemens Converter Valve of ±800 kV UHVDC Fulong Converter Station

TANG Shixiong<sup>1</sup>, YU Yuebiao<sup>2</sup>, CAO Yunlong<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, HUANG Yu<sup>1</sup>, ZHAO Ran<sup>1</sup>, LIU Longchen<sup>2</sup>

(1. UHVDC Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610042, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** The saturable reactor in Siemens converter valve of ±800 kV UHVDC Fulong converter station has complex structure and low reliability, and its water cooling pipeline is easy to leak during operation, which results in the block-locking of DC power system for many times. Based on the analysis of typical defects of saturable reactor in Siemens converter valve and combined with the practice of UHVDC transmission project, a new saturable reactor for Siemens converter valve is designed and developed, which has been successfully applied to the reactor modification of converter valve in Fulong converter station. The test results show that because single winding and single cooling pipeline is designed for the new saturable reactor, not only the external electrical performance, cooling water flow characteristics, structure size and weight of the reactor basically keep unchanged, but also the reliability of cooling water circuit of the reactor is significantly improved, and the operating vibration stress and noise level of the reactor are reduced, which can meet the technology needs of UHVDC transmission project. It has very important engineering application value for improving the intrinsic safety of converter valve equipment and ensuring the energy availability of DC power system.

**Key words:** HVDC transmission; converter valve; saturable reactor; water leakage; defect modification

## 0 引言

复奉直流为双极直流系统, 额定电压±800 kV,

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目(521997220015)

最高运行电压为±809 kV, 额定电流为 4000 A。复龙换流站通常为整流运行, 单极为 2 个电压相等的 12 脉动换流器串联而成, 换流阀设备为西安西电电力整流器有限责任公司(以下简称西整公司)生产的采用西门子技术的 KGWF-4000/±800 型 ETT 换

流器。该站采用的西整公司西门子大组件换流阀在国内外直流输电工程中有着广泛应用,其安装于双极高、低端 4 个阀厅中。每个阀厅安装有 6 个双重阀(阀塔),阀塔采用悬吊式结构,每个双重阀(阀塔)由 2 个单阀组成,每个单阀包括 2 个阀组件,每个阀组件(阀层)包括 2 个阀模块,每个阀模块由 15 个晶闸管级、2 个饱和电抗器、1 个冲击电容组成<sup>[1]</sup>。

复龙站双极四阀组换流阀共有饱和电抗器 384 只。换流阀中串联饱和电抗器,在阀刚触发导通或出现电流突变时限制了电流的变化速率,使阀免于不均匀导通产生局部过热而引起的破坏<sup>[2-3]</sup>。当阀导通稳定,流过阀的电流很大时,电抗器饱和,呈现出低阻抗。在阀组件的电气连接中,电流、电压首先接入 2 个串联电抗器,后接入晶闸管级中,起到保护阀组件的作用。饱和电抗器不但能限制晶闸管刚开通时的  $di/dt$ ,还可在晶闸管关断过程中限制  $di/dt$ ,降低反向恢复电荷,抑制其反向过冲<sup>[4]</sup>。另外,也可利用足够的阻尼来阻止电流过零时产生振荡涌流,保护晶闸管;在冲击电压下起辅助均压作用,使晶闸管免受电压损坏。

西门子大组件换流阀配置的阳极饱和电抗器采用双线圈与电抗器阻尼电阻的配置结构,运行时需同时冷却线圈及二次电阻<sup>[5-7]</sup>。该型电抗器的电气接线、机械结构和冷却水路均较为复杂,其中各类接头多达 20 余处,且整体呈现开放式结构,密封性较差。西门子阀电抗器存在多种设计缺陷,长时间运行各类隐患逐渐暴露,导致电抗器电气特性退化<sup>[8-11]</sup>,且其冷却回路易漏水、可靠性降低,影响了换流阀设备本质安全及直流输电工程稳定运行。

针对西门子阀电抗器在运行中出现的漏水、发热等重大缺陷隐患,下面基于复龙换流站近 10 年的运行数据,统计换流阀饱和电抗器典型缺陷,并分析成因、制定对策。参考 ABB 公司换流阀饱和电抗器的先进设计经验,设计并试制适用于复龙站西门子大组件换流阀的新型一体式饱和电抗器,开展新型电抗器伏秒特性试验及特高压工程应用。

## 1 饱和电抗器典型缺陷及分析

西门子大组件换流阀饱和电抗器外形如图 1 所示。该型电抗器的主要部件为铁芯和线圈,采用了“双线圈+电抗器阻尼电阻”的配置结构。将硅钢片

制成 U 形,两组硅钢片对接为环形,组成电抗器的铁芯,并在其连接处放置一层特制的纸板作为气隙。铁芯两侧各环绕 10 匝线圈。电抗器内部布置了二次电缆和细水管,其中二次电缆是电抗器内部的等电位线;细水管分为氟化乙烯丙烯共聚物 (fluorinated ethylene propylene, FEP) 软管和金属水管, FEP 软管用于电抗器散热,金属水管主要用作二次线圈的散热电阻<sup>[12-13]</sup>。

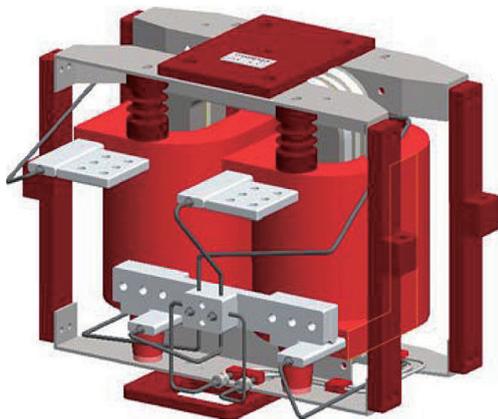


图 1 西门子阀电抗器外形

$\pm 800$  kV 复龙换流站投运至今,西门子大组件换流阀饱和电抗器出现了各类型缺陷及故障,包括二次电缆磨损、阻尼金属水管漏水、FEP 水管磨损、铁芯下沉、硅钢片散落等,详见图 2 所示。特别是近 5 年,复龙换流站先后有 7 台阀电抗器在运行过程中或静态水压试验时出现金属水管漏水故障,严重影响了复奉特高压直流工程的安全稳定运行。

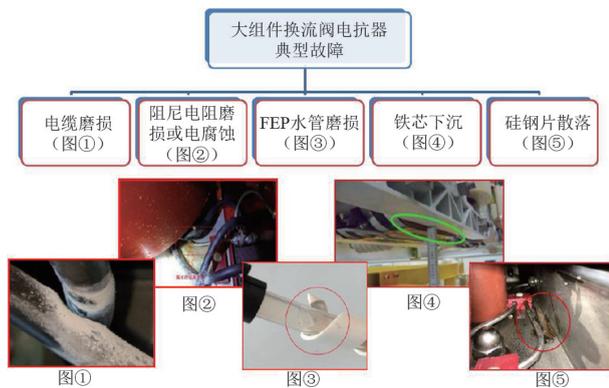


图 2 西门子阀电抗器典型缺陷

### 1.1 二次电缆与金属水管接触磨损及腐蚀

电抗器二次电缆与金属水管接触磨损如图 3 所示。电抗器内部二次电缆设计过长且电抗器内部空间有限,导致电抗器在运行一段时间之后,电缆与金属水管发生接触。在接触位置,二次电缆首先产生磨损,露出内部芯线。内部芯线暴露后,与阻尼电阻

金属水管之间存在电位差,因此产生放电导致金属水管遭受电腐蚀,长期运行后产生穿孔导致内冷水泄漏。当环境较潮湿时,二次电缆与金属水管接触部分会产生冷凝水,吸附灰尘发生电化学腐蚀。



图3 电缆和水管接触磨损缺陷

### 1.2 金属水管与环氧压板振动磨损

如图4所示,电抗器金属水管用一个环氧压板固定,两者间是刚性连接。换流阀正常开通关断时产生的电压跳变会导致电抗器出现高频振动,而环氧压板材质较硬,长期振动情况下支撑部位的阻尼电阻金属水管壁磨损严重,极易导致漏水。另外,换流阀长期运行后,水管压板表面积累了一些灰尘,产生了轻微的局部放电现象,对金属水管产生了电腐蚀。在两种因素的共同作用下,金属水管表面破损漏水。



图4 水管与压板振动磨损缺陷

### 1.3 FEP水管磨损与铁芯脱落散片

由于FEP水管较长,外部缠绕一圈包裹带,并用卡扣固定。由于换流阀运行振动,水管与水管、水管与卡扣、水管与包裹带之间都会产生机械磨损,导致水管漏水。饱和电抗器铁芯是垂直

布置,两侧结构件通过夹紧力将铁芯压紧。长期运行后,内部结构有所松动,夹紧力下降,结构件无法将铁芯压紧,导致铁芯出现下沉(向下位移)的现象,见图5所示。



图5 铁芯下沉缺陷

饱和电抗器铁芯是开放的,长期运行后其表面积累灰尘,其内部容易发生局部放电,从而降低了铁芯硅钢片的绝缘强度。绝缘性能下降又会加剧局部放电,产生恶性循环,最后铁芯硅钢片间短路。在电热应力和机械振动的双重作用下,硅钢片出现散落。散落的硅钢片掉落至下层阀塔,导致下层阀塔放电甚至起火。另外,电抗器铁芯腐蚀加长期振动散片,还会造成阻尼电阻和边框搭接产生放电,长期作用下击穿金属水管引发渗漏。

## 2 新型饱和电抗器的结构设计和性能验证

### 2.1 新型饱和电抗器的结构及优势

基于上述分析,不难看出西门子阀阳极饱和电抗器的运行缺陷主要集中于铁芯和水管,而铁芯作为饱和电抗器的核心部件,在传统设计结构的基础上难以实现优化升级,隐患无法得到根治。因此,针对上述传统西门子换流阀电抗器的缺陷与隐患,参考ABB技术小组换流阀饱和电抗器的成熟设计和运行经验,设计了如图6所示的新型一体式结构的饱和电抗器,用于替换复龙站西门子大组件换流阀的电抗器。

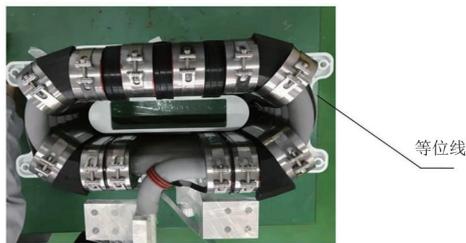
如图7所示,该型饱和电抗器采用中空的圆形铝管制成电抗器的线圈,运行时内冷水从铝管中流过,为线圈散热。铁芯采用分布式布局,固定在线圈上,并置于玻璃钢的绝缘外壳中,其间再用环氧树脂填充。环氧树脂既是固体绝缘材料,也可在铁芯和线圈之间起到缓冲作用。新型饱和电抗器不必配置二次电缆,彻底消除了二次电缆导致的多种缺陷。



图 6 新型饱和电抗器外观



(a) 铝制环形线圈



(b) 分布式布局铁芯

图 7 新型饱和电抗器内部结构

相比较于原有设计,新型饱和电抗器的优点如下:

1) 新型饱和电抗器保持外部电气性能、冷却水流量特性、安装结构尺寸及质量基本不变,其电气参数及接口与原电抗器保持一致,不需要改变换流阀设计。

2) 新型饱和电抗器优化了水路设计,水路采用单一路径通流形式,且整体封装于电抗器内部;相比老式电抗器,其冷却回路减少两路,且只有“一进一出”两个接头,水路接头数量由 12 个减少到 2 个。新设计减少了水管支路和接头数量,大幅消除水路接头渗漏水隐患,有效避免冷却回路暴露于空气中易受外部因素影响而漏水,显著提高了冷却水路的可靠性。

3) 新型饱和电抗器采用单线圈设计,不再需要配置电抗器二次阻尼电阻及其等电位连接电缆,彻底摒弃了薄壁金属水管用作二次阻尼电阻的设计,消除了薄壁金属水管漏水和二次电缆磨损等隐患。

4) 新型饱和电抗器采用全包裹式结构,线圈、

铁芯和外壳封装为一个整体,内部填充绝缘材料,在保证密闭性同时提高绝缘特性。通过优化结构设计<sup>[14]</sup>,降低了噪声和振动,避免原电抗器运行中出现的硅钢片脱落、漏水等问题。

## 2.2 新型饱和电抗器的试验验证

为了确保新型饱和电抗器满足西门子大组件换流阀的技术要求,需对饱和电抗器及其阀组件开展多项试验,其中:饱和电抗器的本体试验 13 项,包括伏秒特性试验、工频和冲击电压耐受试验、工频电感和直流电阻测量、热循环和热态冲击试验、线圈温升试验、故障电流耐受试验等;阀组件试验 4 项,分别为最大连续运行负载试验、最大暂态运行负载试验、故障电流试验、非周期触发试验。

直流输电换流阀用饱和电抗器的不饱和电感值及伏秒积是其运行关键电气参数,按照目前西门子换流阀设计报告中所提供的晶闸管参数及直流工程经验,要求阀电抗器的不饱和时间大于  $2 \mu\text{s}$ ,且电流上升率不高于  $350 \text{ A}/\mu\text{s}$ ,以避免晶闸管因  $di/dt$  过高而损坏,换流阀电气设计时还应考虑一定的晶闸管保护裕度。

饱和电抗器的伏秒特性试验是评估其保护特性的重要试验,要求在  $58 \text{ kV}$  冲击电压下,电压电流波形无异常,伏秒积满足  $(155 \pm 5\%) \text{ V} \cdot \text{ms}$ 。西门子阀饱和电抗器和新型饱和电抗器的保护特性通过电流时间曲线表征,如图 8 所示。试验结果表明,新型电抗器特性满足晶闸管开通时电流上升率要求,且电气特性与原西门子电抗器保持一致。

同时,在特高压换流阀组件合成试验平台上对新型饱和电抗器和老式西门子阀电抗器开展了运行振动对比试验。

试验结果表明,新式饱和电抗器的振动受力及噪声水平全面优于老式西门子阀电抗器:

1) 振动加速度:新式电抗器振动强度约相当于老式电抗器振动  $30\% \sim 40\%$ 。

2) 振动噪声:新型饱和电抗器为  $82.86 \text{ dB}$ ,西门子阀电抗器为  $87.02 \text{ dB}$ 。

## 3 新型饱和电抗器的工程应用

在  $\pm 800 \text{ kV}$  特高压复龙换流站的西门子大组件换流阀中换装上述新型饱和电抗器,在 2021 年度“迎峰度夏”间持续监测其运行状态,最大运行电流

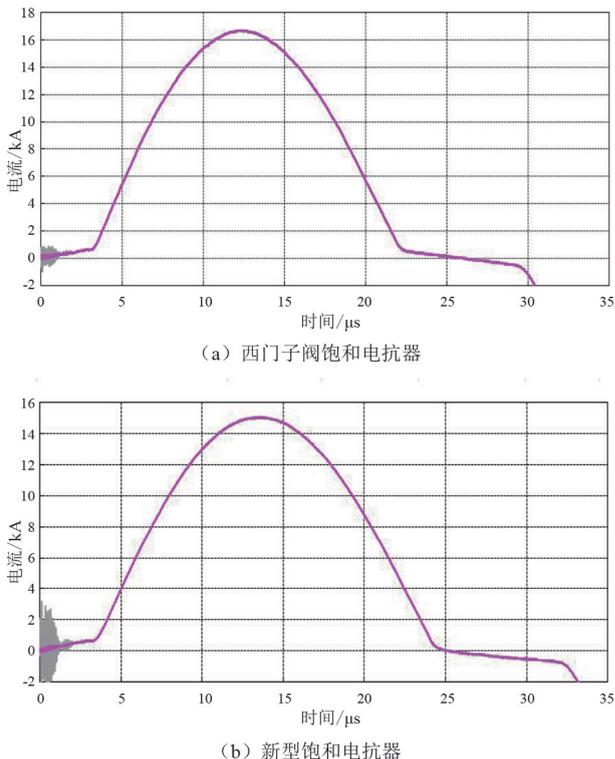


图8 饱和电抗器电流时间曲线

为4000 A,输送功率为6400 MW。红外测温结果如图9所示,发现新型饱和电抗器运行温度在40~55℃正常范围,最高温度为52.5℃,略低于原饱和电抗器的最高运行温度53.4℃。经运行巡视、红外测温和紫外放电检测,确认所有换装的饱和电抗器均运行良好,未出现放电现象,换流阀整体及其元部件均工作正常,符合工程技术与应用要求。



图9 新型饱和电抗器运行红外图谱

## 4 结论

上面基于复龙换流站西门子大组件换流阀技术

特点与运行故障统计,分析了换流阀饱和电抗器的典型缺陷及其成因,研制了一种可替换老式西门子阀电抗器的新型一体式饱和电抗器,并成功用于复龙站换流阀电抗器改造,得到了以下结论:

1) 西门子阀电抗器采用双线圈与阻尼电阻的配置,导致电气接线、机械结构和冷却水路复杂,且整体呈开放式结构、密封性差易漏水。长时间运行,该型阀电抗器多次出现了二次电缆与金属水管接触磨损及腐蚀、金属水管与环氧压板振动磨损、FEP水管磨损与铁芯脱落散片等多种缺陷。

2) 新型饱和电抗器采用单线圈和单管路设计,既保持了电抗器的外部电气性能、冷却水流量特性、安装结构尺寸及重量等基本不变,还显著提高了电抗器冷却水路的可靠性,也降低了运行振动受力及噪声水平,可满足西门子特高压换流阀设备的应用要求。

## 参考文献

- [1] 赵晚君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 王华锋, 林志光, 张海峰, 等. ±800 kV 特高压直流工程换流阀故障分析与优化设计方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 67-73.
- [3] 刘隆晨, 张星海, 李亚伟, 等. 特高压直流输电换流阀用晶闸管反向恢复特性研究与分析[J]. 四川电力技术, 2017, 40(1): 51-54.
- [4] 陈鹏, 孙宝奎, 纪锋. ±1100 kV 特高压直流换流阀饱和电抗器样机的失效模式与加速寿命试验方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2612-2617.
- [5] 米彦, 邓胜初, 桂路, 等. ±1100 kV 特高压直流换流阀用饱和电抗器的铁损及温度分布仿真[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3359-3367.
- [6] 纪锋, 曹均正, 陈鹏, 等. HVDC 整流侧阀饱和电抗器铁损仿真研究[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2680-2684.
- [7] 张长庚, 王家俊, 李永建, 等. 特高压换流阀阳极饱和电抗器动态铁芯损耗模拟[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 2158-2168.
- [8] 陈鹏, 曹均正, 魏晓光, 等. 高压直流换流阀用饱和电抗器的暂态电路仿真模型[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 288-293.
- [9] 纪锋, 曹均正, 陈鹏, 等. 高压直流输电系统逆变侧阀饱和电抗器电气应力研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2579-2585.
- [10] 高雪恒, 唐志国, 仲崇山, 等. 高压直流换流阀饱和电抗

器脉冲电流应力仿真研究[J].高压电器,2018,54(6):113-119.

- [11] 张雷,王康,杨晓平,等.一种改进型换流阀饱和电抗器电流应力分析[J].电力电子技术,2020,54(8):22-25.
- [12] 张雷,刘宁,董妍波,等.特高压直流换流阀电抗器端子发热问题研究[J].高压电器,2016,52(7):50-54.
- [13] 刘磊,汪得利,黄华,等. $\pm 1100$  kV/5455 A 特高压直流换流阀饱和电抗器散热设计与研究[J].高压电器,2020,56(7):23-28.

- [14] 陶敏,姚舒,董妍波,等.特高压换流阀用饱和电抗器的振动研究与优化方案[J].高压电器,2019,55(12):200-204.

作者简介:

唐世雄(1990),男,工程师,主要从事特高压直流换流站运维技术工作;

喻悦箫(1993),女,硕士,主要从事柔性直流输电及电力电子技术研究。

(收稿日期:2021-11-09)

(上接第 56 页)

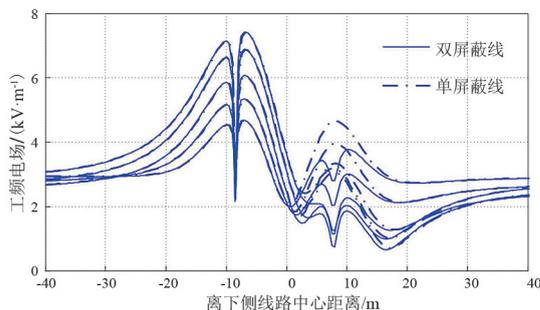


图 8 架设屏蔽线后线路下方不同横断面  $E$  值

架设屏蔽线后交叉线路下方  $E$  值如图 9 所示。

可以看出,CPSO 寻优位置基本在畸变的马鞍面电场峰值附近,架设单屏蔽线可以将加权场强均值从 3.91 kV/m 降至 3.29 kV/m,而架设双屏蔽线降可至 2.85 kV/m,场强峰值位置处降低较明显,屏蔽效果良好。

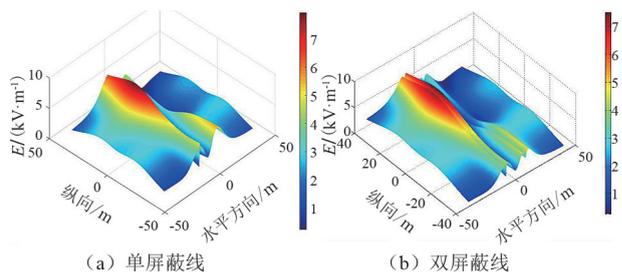


图 9 架设屏蔽线后交叉线路下方  $E$  值

## 4 结论

上面采用有限元法,通过一系列仿真实验,在构造的区域目标函数基础上,研究线路相序布置和交叉角对空间电磁环境的影响,并给出可用于工程的相序排列方式及交叉角建议:为简化设计难度,在满足设计要求时,上层双回路宜采用逆相序布置,交叉

角可适当减小,以降低空间电磁污染。

采用架设屏蔽线的方式改善地面电磁环境,并引入混沌变参数粒子群算法,对屏蔽线架设位置进行目标寻优,寻优过程中,动态减小混沌控制参数值,使算法在迭代过程中逐步减弱混沌运动,进而在保留混沌粒子群优化算法优点的基础上,又增添了粒子群体的多样性,实现快速跳出局部最优点,寻找全局最优解。通过 CPSO 算法对屏蔽线架设位置寻优,实现区域电磁环境屏蔽效果最优。

## 参考文献

- [1] 环境保护部.电磁环境控制限值:GB 8702—2014[S].北京:中国环境科学出版社,2014.
- [2] 宋福根,林韩,兰生.特高压输电线路交叉跨越区域工频电场分布计算[J].电气技术,2016(1):6-10.
- [3] 虎涛涛,单要楠.一种混沌变参数粒子群优化算法[J].自动化仪表,2017,38(3):37-40.
- [4] 肖冬萍,姜克儒,张占龙,等.工频电磁环境条件约束下的超/特高压输电线路结构布局寻优方法[J].中国电机工程学报,2015,35(9):2333-2341.
- [5] 倪正光,杨仕友,钱秀英.工程电磁场数值计算[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [6] 陈楠,文习山,刘波,等.高压输电导线三维工频电磁场计算与测量[J].电网技术,2011,35(3):159-164.
- [7] 倪琳,段超,贾春兰.差分进化混合粒子群算法求解项目调度问题[J].计算机应用研究,2011,28(4):1286-1289.

作者简介:

马明智(1987),男,硕士,工程师,主要研究方向为输电线路电气设计与电力系统电磁计算;

杨昌杰(1993),男,助理工程师,主要研究方向为输电线路电气设计。

(收稿日期:2021-10-13)

# 链式网络中区域备用电源自动投入的风险控制及策略优化

殷攀程,刘鑫,袁明哲,郑茜元,陈翔

(国网四川省电力公司成都供电公司,四川成都 610041)

**摘要:**链式供电网络结构大量存在于电力系统中,区域备自投装置凭借在链式网络中电源点故障时能快速恢复供电的优势在现场应用逐渐广泛。文中通过深入分析区域备自投与常规备自投装置在动作逻辑方面的差异,提出区域备自投装置在安装调试、整定计算、运行维护中的风险及相应的控制措施。针对目前区域备自投逻辑控制策略中仅采用母线失压和主供电电源线路无电流作为判据的问题,提出新增“本侧开关位置”“联络线对侧有压”两个逻辑判据,有效规避变电站轻负荷且母线PT断线情况下的误动作。最后,结合110 kV草池—十里坝链式网络搭建RTDS仿真系统,对电源点、联络线故障以及断路器偷跳、母线PT断线进行了仿真测试,结果表明,优化后的控制策略能准确定位故障区,快速合上备用电源,减少误动作发生,有效地提高链式网络的供电可靠性。

**关键词:**链式网络;区域备自投;PT断线;判据优化;RTDS仿真

**中图分类号:**TM 762 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)03-0089-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220316

## Risk Control and Strategy Optimization for Regional Automatic Input Device of Backup Power Supply in Chain Power Network

YIN Pancheng, LIU Xin, YUAN Mingzhe, ZHENG Qianyuan, CHEN Xiang

(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** There are a large number of chain power supply networks existing in power system, where the regional automatic input device of backup power supply is widely used due to its advantage of quickly restoring power when the power supply fails. The principle and operation logic differences of regional automatic input device of backup power supply are analyzed, and the major risks and the corresponding control measures are pointed out for installation and commissioning, setting calculation and maintenance. Two extra logic criteria are also introduced, that is, the switch position of this side and the voltage of the other side of tie line, which can effectively avoid the possible malfunction behavior in the case of lightload and busbar PT breaking in substation. Finally, combined with the 110 kV Caochi-Shiliba chain power network, the RTDS simulation system is built. The simulation tests are carried out under different cases such as power supply point, tie line failure, switch trip without fault and busbar PT breaking. The results show that the regional automatic input device of backup power supply can locate the fault point accurately, switch to the backup power supply and restore power quickly, and optimize the busbar voltage loss criterion to avoid the malfunction behavior, which will improve the power supply reliability of chain power network.

**Key words:** chain power network; regional automatic input device of backup power supply; PT breaking; criteria optimization; RTDS simulation

## 0 引言

随着电力系统可靠性要求的提高,接线简单、可靠性高的备用电源自动投入(以下简称备自投)装置得到了广泛应用。备自投装置是指当电网出现故

障时,能够和其他保护相配合,迅速切除故障且将备用电源投入或将运行线路投入到备用电源上,以减少失电时间的装置。

常规备自投可以保证多电源变电站的可靠性,然而,在不少地区由于山地地形或系统短路容量的限制,往往系统中需要有开环点,从而形成链式网

络、辐射网络或者两个特征都具备的链式辐射网络。区域备自投凭借在链式结构串供变电站电源点故障时能快速恢复供电的优势逐渐广泛在现场应用,技术也日益成熟<sup>[1-2]</sup>。

下面分析常规备自投的局限性,介绍了区域备自投的动作逻辑、工程运用中的风险和措施以及判据优化。同时结合 110 kV 草池—十里坝链式网络搭建了 RTDS 仿真系统,对典型的故障进行了测试分析。

## 1 常规备自投的局限性

传统常规备自投装置受到电网结构和方式的局限较大,通常适用于非开环站点变电站。在链式电网实际运行中,一旦出现故障,常规备自投难以准确识别当前运行方式、定位故障、联调远方备自投装置进行动作,难以及时投入备用电源,减少停电时间<sup>[3-7]</sup>。

以图 1 链式网络为例,开环点设在 D 变电站处,仅可实现该站的进线备自投功能。如果此时在 AB 变电站中间发生 K1 故障,该条线路保护将动作,跳开 A1、B1 断路器,导致 B、C 变电站失电,而有常规备自投功能的 D 变电站检测到本站母线电压正常不会动作,D1 断路器不会动作,那么 B、C 变电站将继续失电,传统备自投装置只能在 D、E 变电站中间发生 K2 故障时,才能准确动作,跳开 E1 断路器和 D2 断路器,合闸 D1 断路器,恢复供电。从此案例可以得出,在电网以链式结构运行和发生故障时,传统备自投装置有概率不准确动作,难以恢复供电<sup>[8]</sup>。

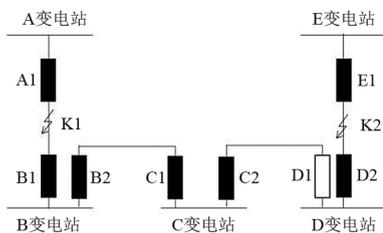


图 1 链式网络

## 2 区域备自投逻辑及风险控制

### 2.1 区域备自投动作逻辑

备自投装置逻辑原理见图 2。动作逻辑的控制条件包括:充电条件、闭锁条件和启动条件。当所有充电条件都得到满足,所有闭锁条件都不满足时,如

果有放电情况,备自投装置将无法动作;如果满足启动条件,即备用有压,母线无压,主供线路无流,则装置出口动作<sup>[9-12]</sup>。

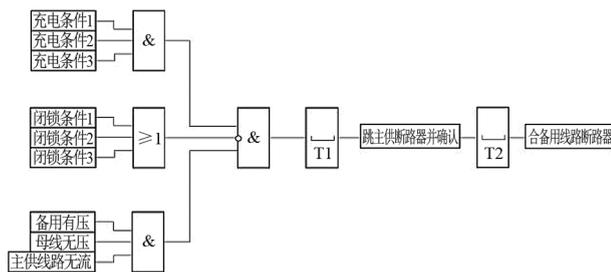


图 2 备自投装置动作逻辑

常规备自投分为 4 种工作方式:线路备投(包含自投方式 1 和方式 2)、分段(桥)自投(包含自投方式 3 和方式 4)。

而区域备自投的工作原理是根据本侧变电站和远方变电站的连接方式,识别电网的网架结构、运行方式以及开环点位置,当该区域内发生任何故障时,均能准确及时跳开失压线路或变电站的主供电源断路器,合上链式网络中开环点的备用电源,恢复供电。以常见的某区域备自投装置为例,其工作方式有 6 种,除上述的自投方式 1~4 外,还有联络线开环点处备投(方式 5)和联络线合环点处无压跳闸(方式 6)两种,对应的系统运行方式如图 3 所示。

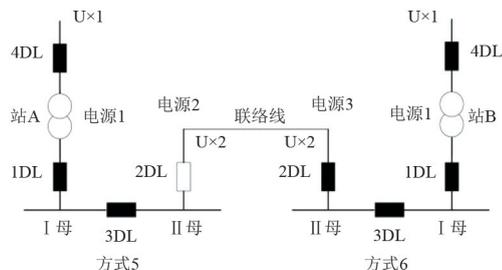


图 3 某区域备自投运行方式(方式 5、方式 6)

方式 5 的充电条件为:

- 1) I 母、II 母均三相有压,  $U_{x2}$  有压或者通道正常时,对侧站 II 母有压并且对侧 2DL 断路器在合位;
- 2) 1DL 断路器在合位, 2DL 断路器在分位, 3DL 断路器在合位, 经备自投充电时间后充电完成。

其动作过程为:当充电完成后,2DL 断路器所在的 II 母有压,通道正常并且对侧站 II 母无压,  $U_{x2}$  无压,收到“对侧启动远方自投”信号,则备自投启动,经整定延时后合 2DL 断路器。

方式 6 的充电条件为:

- 1) I 母、II 母均三相有压;
- 2) 1DL、2DL、3DL 断路器在合位, 经备自投充电

时间后充电完成。

其动作过程为:

1) I母、II母均无压, I1无流, 4DL断路器或1DL断路器在分位。

2) I母、II母均无压(三线电压均小于无压启动定值), I1无流, 4DL、1DL断路器均在合位并且 $U \times 1$ 无压。

满足上述两个条件中任一条件, 则启动, 经延时跳开1DL断路器。确认1DL断路器跳开, 并且I母、II母均无压后, 给对侧发启动远方自投信号。

3) 若分段断路器偷跳, 即3DL断路器跳开, II母无压, 则启动, 经延时跟跳分段3DL断路器。确认3DL跳开后且II母无压, 给对侧发启动远方自投信号。

## 2.2 区域备自投工程运用中的风险及控制措施

区域备自投相较于常规备自投, 有更复杂的逻辑原理, 其风险存在于安装调试、整定计算、运行维护3个方面, 需要对其重点研究分析, 实现区域备自投装置的可靠运行<sup>[13-14]</sup>。

### 2.2.1 安装调试风险

1) 区域备自投装置可以接合后位置继电器(KKJ), 也可以接手跳继电器(STJ), 但如果采用后者的接线方式, 手分本站断路器时, 本站备自投装置不会对侧发送“闭锁远方备自投”信号, 可能会造成对侧站备自投误动作。因此需要对侧站提前退出备自投相应功能, 这既增加了运行维护人员工作量, 又增加了安全风险, 因此建议两侧都采用接入KKJ的方式。

2) 现场进线电源PT二次额定值可能不同, 如进线1为57.7V, 进线2为100V。若装置有压定值按线电压整定且可以根据PT二次额定电压自适应调整, 则进线电压按实际接线即可; 若无法自适应调整, 则应该改变PT抽头, 将2条进线电压接为一致。

3) 普通备自投联切小电源是通过跳主供电源的备用出口进行联切。但区域备自投在方式4充电时(如图4所示), 当满足II母无压, I2无流, I母有压, 2DL断路器在合位并且 $U \times 2$ 无压时, 同时收到对侧站“对侧启动远方自投”开入, 则本站不会动作跳2DL断路器, 因而也不联切小电源。此时区域备自投会直接动作合3DL断路器, 造成小电源与系统电源的非同期合闸, 所以安装调试时需要启用“联跳I母开关出口”“联跳II母开关出口”功能, 完善

相应的接线, 保证一旦有母线失压的情况, 立即联切小电源开关, 避免非同期合闸。

4) 备自投装置投运前需要进行完整的带断路器传动试验, 常规备自投传动时可以通过遥跳对侧站主供电源的方式进行。但是如果在区域备自投中传动时如果遥跳联络线对侧断路器, 则对侧站会向本站发送“闭锁远方备自投”信号从而导致区域备自投动作闭锁, 传动试验失败。因此在制定区域备自投装置带断路器传动方案时应注意方案的正确性和合理性, 尽量减少传动次数, 减轻对一次设备尤其是变压器的冲击。

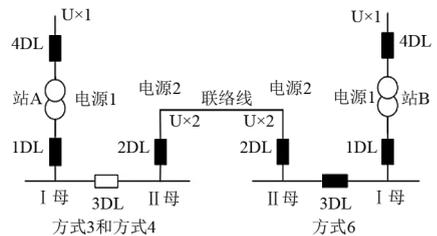


图4 某区域备自投工作方式(方式3、方式4、方式6)

### 2.2.2 整定计算风险

1) 电压取值整定。区域备自投装置需要按照线电压值对其有压定值、无压启动定值、无压合闸定值进行整定<sup>[13]</sup>。

2) 跳闸时间整定。装置要实现远方备自投功能, 则区域备自投方式6中跳主供电源时间应小于方式2、方式4中的跳闸时间, 并考虑一定裕度。保证对侧站失压时通过远方备自投逻辑直接合上开环点断路器, 让失压变电站迅速恢复供电。若不区分区域备自投不同方式的动作时间, 就地备自投可能先于远方备自投动作, 链式网络中的变电站发生故障时可能会长时间失压。

3) 合闸后加速定值整定。合闸后加速逻辑是为了让备自投合闸于故障时能加速跳闸。对于广泛采用进线断路器三相电流进行判断的装置, 其后加速电流整定值应分情况考虑。

方式4中合3DL断路器于故障时, 由于I母有压, 电源1后加速逻辑(如图5所示)中复压闭锁功能生效, 其过流加速段定值可以整定为较小值。方式5中合2DL断路器于故障时, 由于II母无压, 电源2后加速逻辑中复压闭锁功能失效, 同时考虑躲过对侧站两台变压器励磁涌流的影响, 其过流加速段定值可以整定值不能太小。

由于过流加速段定值一般只有一个值, 因此在

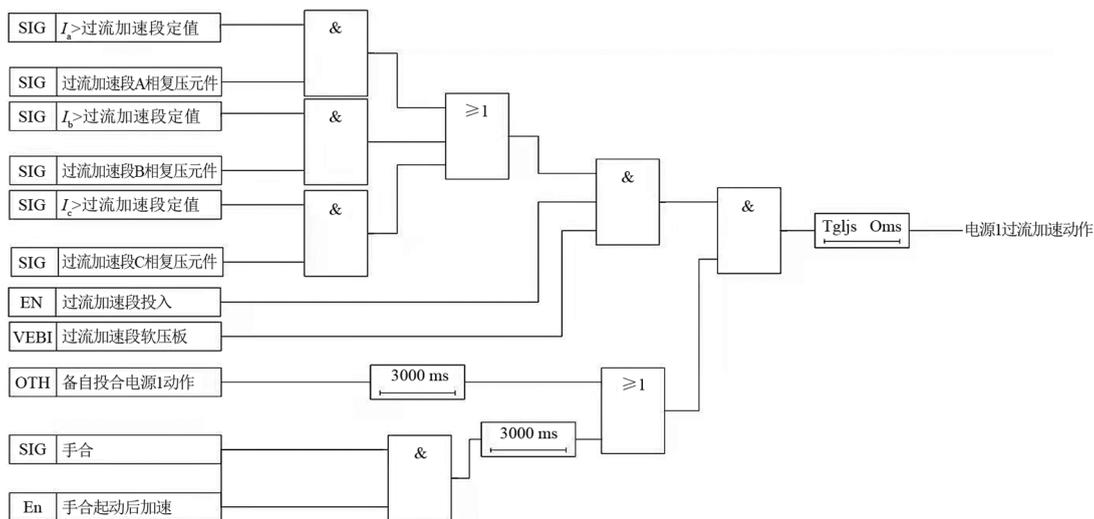


图 5 合闸后加速逻辑

该定值整定时需要进行综合考虑,尽量减小合闸后加速误动或拒动的风险。

### 2.2.3 运行维护风险

若本站区域备自投装置接 STJ,本站进行倒闸操作前,变电运行维护人员应将侧变电站装置闭锁备自投方式 2、方式 4 的功能压板投入,防止本站倒闸时对侧站区域备自投误跳运行断路器,误合备用电源或备用分段断路器,造成继电保护事故。

## 3 区域备自投逻辑控制策略优化

### 3.1 逻辑控制策略的不足

区域备自投动作逻辑中将母线无压且主供线路无流作为判断变电站失电及备自投装置动作的判据。变电站投运初期时负荷较轻,存在线路电流小于无流定值的情况。如果发生母线 PT 断线,区域备自投子站会将母线无压标志上送到区域备自投主站,主站接收到母线无压和线路无流标志后,根据逻辑控制策略的计算会认为这些变电站失电,从而导致区域备自投误动作。

### 3.2 逻辑控制策略的优化

针对轻负荷运行时区域备自投可能误动作的问题,通过在逻辑控制策略中加入“本侧开关位置”“联络线对侧有压”两个逻辑判据,对区域备自投逻辑控制策略进行了优化。具体逻辑控制策略如下:

母线失压动作判据:1) 母线无压、主供线路无流、主供线路无压并且主供线路断路器在合位;2) 母线无压、主供线路无流、主供线路断路器在分

位。满足以上任一条件,区域备自投认为母线失压,区域备自投跳失压变电站的主供电源,合备用的开环点断路器<sup>[15]</sup>。

母线失压闭锁判据:开环点不在联络线断路器上,且联络线本侧母线无压、联络线无流、联络线本侧断路器合位和对侧有压。此时认为母线 PT 断线,不是母线失压,区域备自投闭锁。

优化后的动作逻辑如图 6 所示(红框内为增加逻辑)。

## 4 案例分析

基于链式结构的区域备自投,对成都 110 kV 草池—十里坝变电站链式供电网搭建 RTDS 仿真环境进行案例分析<sup>[16-17]</sup>。

如图 7 所示,仿真试验系统依照实际情况共设置 4 个变电站:220 kV 海鸣站和棉丰站、110 kV 草池站和十里坝站。其中海鸣站和棉丰站为电源点,此次仿真未配置装置,默认其一直有压。链式供电结构的草十线断路器 152 为开环点,110 kV 十里坝站 10 kV II 母有小电源接入。

仿真主要测试当系统在 k1、k2 和 k3 处故障,发生海草线、草十线、棉十线线路断路器偷跳以及在判据优化前后发生母线 PT 断线时,区域备自投的相应动作行为。此种运行方式下的测试结果见表 1。

RTDS 仿真测试结果表明:

1) 区域备自投可以正确定位故障点,快速传输信号至对侧变电站,跳主供电源,合备用电源,快速恢复供电;

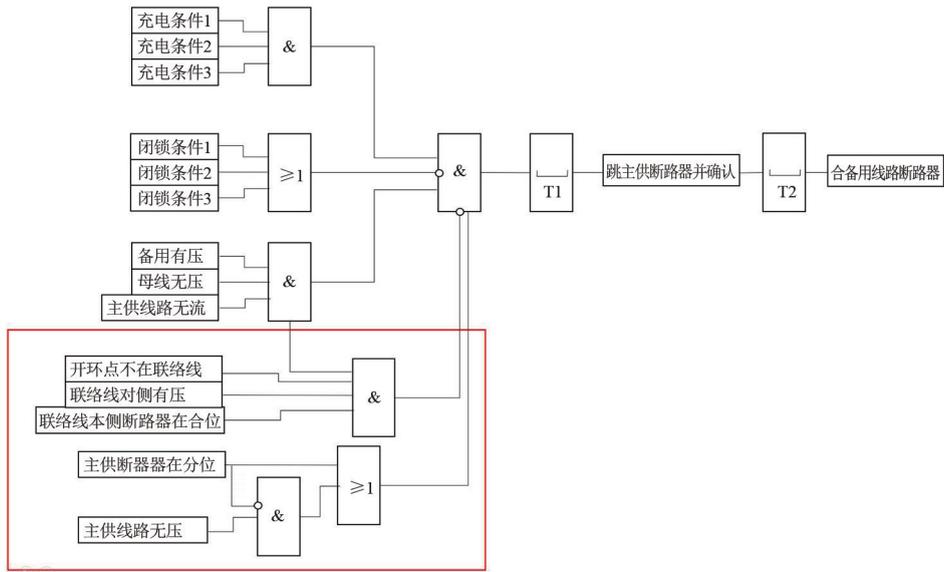


图 6 优化后备自投动作逻辑

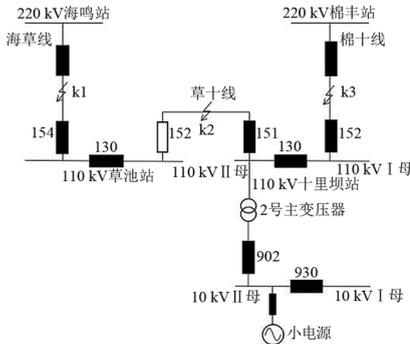


图 7 成都 110 kV 草池—十里坝变电站链式供电网 RTDS 仿真系统

表 1 RTDS 仿真测试结果

故障位置	动作行为
k1 故障	跳海草线断路器 154, 合草十线断路器 152
k2 故障	放电
k3 故障	跳棉十线断路器 152, 合草十线断路器 152, 联切小电源
海草线断路器 154 偷跳	跟跳海草线断路器 154, 合草十线断路器 152
草十线断路器 151 偷跳	放电
棉十线断路器 152 偷跳	跳棉十线断路器 152, 合草十线断路器 152, 联切小电源
十里坝站 I 段母线轻载 PT 断线(优化前)	误动作, 跳棉十线断路器 152, 合草十线断路器 152, 联切小电源
十里坝站 I 段母线轻载 PT 断线(优化后)	放电
十里坝站 II 段母线轻载 PT 断线(优化前)	误动作, 跳草十线断路器 151
十里坝站 II 段母线轻载 PT 断线(优化后)	放电

非同期合闸;

3) 判据优化有效地规避了变电站轻负荷运行时, 母线 PT 断线导致的区域备自投误动作。

## 5 结 论

在链式供电结构中, 常规备自投无法适应供电可靠性的要求, 存在很大的局限性。区域备自投装置的引入较好地解决了这一问题, 它可以在链式网络故障时准确地合上开环点断路器, 快速恢复供电。所提出区域备自投装置在工程运用中存在的三大风险和相应的控制措施, 对工程实践有较强的指导意义, 同时优化区域备自投的逻辑控制策略解决了其误动的可能性, 增强了区域电网的供电可靠性。

### 参考文献

[1] 侯有韬. 区域性备自投的控制方法研究[J]. 云南电力技术, 2018(4): 41-45.

[2] 孙镜轩, 尧长国, 祁有年. 基于链式网络的区域备自投控制系统分析运用[J]. 电力学报, 2021, 36(2): 139-148.

[3] 金震, 董凯达, 陈军, 等. 基于实时信息的区域备自投研究与实现[J]. 中国电力, 2016, 49(12): 76-80.

[4] 林国松, 陆千毅, 臧怡宁. 基于实时信息的区域备自投装置自动投退控制系统研究[J]. 浙江电力, 2020, 39(9): 20-25.

[5] 高贵云. 110 kV 内桥接线备自投装置改进[J]. 中国电力, 2011, 44(12): 89-92.

[6] 周伊琳, 孙建伟, 陈炯聪. 区域网络备自投及其测试关

2) 区域备自投可通过“联跳 I 母开关出口”“联跳 II 母开关出口”功能及时联切馈线小电源, 避免

