

证据理论在配电网故障定位中的应用

高艺文,刘明忠,吴 杰

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘要:将不同的故障指示器当作独立的传感器,利用其采集的故障信息形成不同的证据,然后通过改进的 D-S 证据理论对形成的证据进行融合,最后依据改进的决策原则得到最终的故障定位结果。仿真分析表明,该方法在故障信息误报或漏报的情况下,定位结果仍然可信。为基于故障指示器的故障定位方法提供了新的参考。

关键词:容错性;证据理论;信息融合;故障定位

中图分类号:TM711 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)06-0001-04

Application of Evidence Theory to Fault Location of Distribution Network

Gao Yiwen, Liu Mingzhong, Wu Jie

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Firstly, different fault indicators are treated as independent sensors to form different evidences with the fault information collected by them. Then, the evidences formed are fused through the improved D-S evidence theory, and the final fault location results are obtained according to the improved decision principles. Simulation results show that the proposed method is still reliable in the case of false or missing fault information. It provides a new reference for fault location method based on fault indicator.

Key words: fault tolerance; evidence theory; information fusion; fault location

0 引 言

配电网自动化目的在于实现配电网线路的在线监视及快速准确的故障定位,从而迅速完成故障抢修,提高供电可靠性。配电线路故障指示器作为一种经济、实用的监测设备在配电网自动化中得到大量的应用。当线路发生相间故障或单相接地故障时,故障指示器会翻牌(或闪光)进行就地指示,并将识别到的故障信息通过无线网络上报配电网运行控制主站。主站根据上报的故障信息进行故障定位,并将定位的结果提供给抢修人员,从而缩短故障排查时间,快速地恢复供电。在实际应用中,由于故障指示器安装在户外,受到大风、暴雨、雷电等天气的影响,极易引起故障指示器发生信息误报和漏报的情况,导致传统的故障定位方法不再适用。

目前配电网故障定位方法有以下几类:一类是

人工智能法,如文献[1-4]将遗传、蚁群和神经网络等人工智能算法引入到配电网故障定位中,虽可实现故障定位,但智能算法普遍存在建模复杂、计算速度慢等问题;另一类是矩阵法,如文献[5-6]提出了矩阵算法及其改进算法,虽可实现故障定位但仍存在故障信息漏报或误报时导致定位结果可信度低的问题。此外,文献[7]提出将配电线路故障指示器、配电变压器和用户投诉电话当作传感器,利用不同传感器采集的故障信息进行信息融合得到最终的故障定位结果;然而实际情况中配电变压器和用户投诉电话的信息获取难度较大,且主观性较强,故障定位效果不佳。下面将不同的故障指示器当作独立的传感器,利用其采集的故障信息形成不同的证据,然后通过改进的 D-S 证据理论对形成的证据进行融合,最后依据改进的决策原则得到最终的故障定位结果。仿真分析表明,该方法在故障信息误报或漏报的情况下,定位结果仍然可信。

改进的证据理论

:1.1 D-S 证据理论

D-S 证据理论广泛用于信息融合中处理不确定性问题^[8]。识别框架和基本概率分配是证据理论两个重要的组成。

定义 1 识别框架表示某一决策问题的所有可能结果的集合,设为 U ,则 $U = \{\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_n\}$, 2^θ 表示 U 所有子集的集合。

定义 2 基本概率分配 BPA 是一个映射 $m; 2^U \rightarrow [0, 1]$, 且满足下列条件:

$$0 \leq m(A_i) \leq 1 \tag{1}$$

$$\sum_{A \subseteq 2^U} m(A_0) = 1 \tag{2}$$

$$m(\Phi) = 0 \tag{3}$$

定义 3 Dempster 规则形式化定义如下:
设识别框架 U 的 n 个证据为 $(P_1, P_2, \cdots, P_n)$, 则证据对应的基本信任分配函数为 $m_i (i = 1, 2, \cdots, n)$, 其可表示为

$$m(A) = \begin{cases} 0, A = \Phi \\ (1 - k)^{-1} \sum_{\cap A_i = A} \prod_{i=1}^n m_i(A_i), A \neq \Phi \end{cases} \tag{4}$$

式中, $k = \sum_{\cap A_i = \Phi} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)$, $1 - k$ 为归一化因子是识别框架上所有非冲突命题合成的信任分配值之和。

1.2 D-S 证据理论的改进

当证据之间出现冲突时, D-S 证据理论会融合失效, 因此需对证据进行改进, 使所有证据之间的存在交集, 即可解决以上问题且不影响最终的决策结果。因全集 Θ 与所有证据中子集均有交集, 同时再给所有证据体乘以相同的折扣率 $\lambda (\lambda < 1)$, 即可使所有证据体中都含有全集项 Θ 。

设全集 $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 原始证据的基本概率分配为

$$M_j\{A_1, A_2, \dots, A_n, \Theta\} = \{a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jn}, 1 - \sum_{i=1}^n a_{ji}\} \tag{5}$$

修改后的证据变为
 $M'_j\{A'_1, A'_2, \dots, A'_n, \Theta'\} = \lambda \cdot M_j\{A_1, A_2, \dots, A_n, \Theta\}$

式中: 元素 $M'(A'_i) = \lambda \cdot M(A_i)$; $M'(\Theta) = 1 - \sum M'(A'_i)$ 。

经过改进后所有的证据体的全集 Θ 的信任度都不为 0^[9], 即使都乘以一个相同的折扣率, 证据改

进后的融合结果与改进前的融合结果在数值上只是稍有变化, 但是融合结果各元素的概率值的相对大小是一致的。

1.3 改进决策原则

由原始的决策原则^[10]可知, 当证据融合后出现两个或者多个可信度值相同且最大时, 原始准则无法判断。若选择某元素作为结果可能导致误判。为了解决以上问题, 改进后的决策原则的结果满足式(7)。

$$\begin{cases} m(x_i) = m(A_i), i: 1 \rightarrow n + 1 \\ m(\Theta) < \delta \\ m(x) > m(\Theta) \\ m(x) > \frac{\sum_{i=1}^{n+1} m(A_i)}{n + 1} \end{cases} \tag{7}$$

式中: $m(\Theta)$ 为全集的可信度; δ 为设定的阈值; $m(x_i)$ 为某一元素的可信度值。

当有两个或多个可信度值满足改进后决策原则时, 选可信度值最大的一个作为优先的决策结果, 其他满足条件的可作为备选结果。

改进 D-S 证据理论的故障定位方法

2.1 故障判定区段的划分

将由故障指示器及馈线段组成的封闭集合称为故障判定区段^[11]。

图 1 中 S1 为出线开关的馈线, S2 - S9 为负荷开关, FI1 - FI5 为故障指示器, 按上述定义, 则故障判定区段划分如表 1 所示。

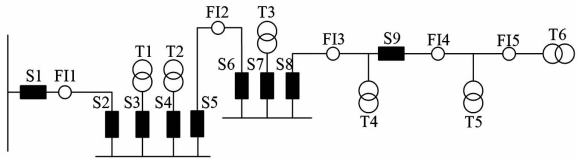


图 1 一个简单的配电网络

表 1 故障判定区段

区段 Z1	区段 Z2	区段 Z3	区段 Z4	区段 Z5	区段 Z6
S1, FI1	FI1, FI2	FI2, FI3	FI3, FI4	FI4, FI5	FI5

由表 1 可知, 故障判定区段 Z6 只有一个故障指示器, 表示其处于配电馈线的末端。

2.2 故障指示器故障上报信息的证据化

当短路故障电流流过故障指示器时会上报故障信息, 由于配电网呈单电源辐射状运行, 因此当故障指示器有故障信息上报时, 则可知故障一定在故障

指示器下游。若故障指示器没有故障信息上报时,则可知故障一定在故障指示器上游。所以根据故障指示器上报的故障信息,均可提供一种可疑故障区段的证据。

图 2 为简单的配电网在某一时刻发生故障时故障指示器故障信息上报情况,则可得表 2。

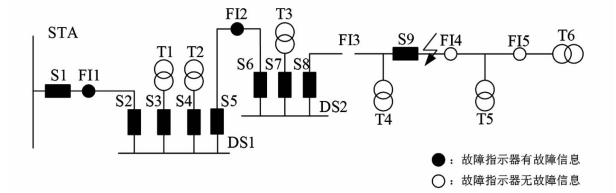


图 2 故障时指示器上报情况

表 2 根据故障指示器上报信息情况形成的证据

故障指示器	是否上报故障信息	证据(可疑故障区段)
FI1	是	Z2,Z3,Z4,Z5,Z6
FI2	是	Z3,Z4,Z5,Z6
FI3	是	Z4,Z5,Z6
FI4	否	Z1,Z2,Z3,Z4
FI5	否	Z1,Z2,Z3,Z4,Z5

2.3 基于证据理论的多故障指示器信息融合

如图 3 所示,在配电网故障时,可以获得多个故障指示器上报的故障信息。每一种故障信息都可以确定一定范围的故障区段,然而信息畸变的出现,使得每一种故障信息确定的故障区域都存在错误的可能性。而证据理论可以融合多个证据,综合考虑多个证据的决策,可以提高决策的可靠性。

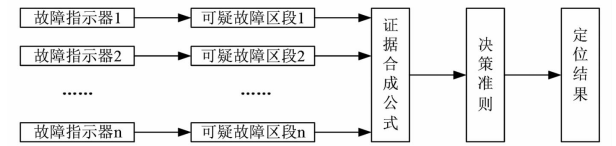


图 3 基于证据理论的多故障指示器信息融合

2.4 基于改进 D - S 证据理论的故障定位的处理流程

- 1)根据故障指示器上报的故障信息获得 n 个可能发生故障区段的证据。
- 2)根据式(5)、式(6)对证据体进行修正。
- 3)根据式(4)进行计算得到不同区段的发生故障可信度。
- 4)根据不同区段发生故障的可信度按照第 1.3 节的决策准则获得故障定位结果。

3 仿真分析

3.1 信息健全时的计算分析

图 4 所示为某地区配电网:STA 为变电站;HW1、HW2 为环网柜;S1 为变电站出线断路器开关,S2 - S9 为负荷开关;T1 - T9 为配电变压器;FI1 - FI9 为故障指示器。

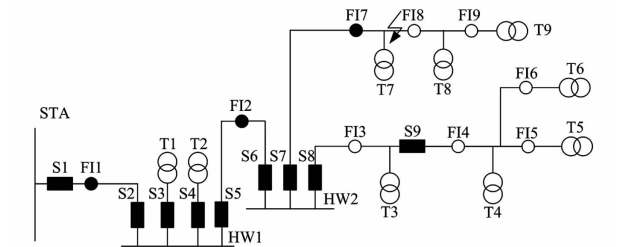


图 4 信息健全时故障指示器运行情况

根据第 2.1 节的定义方法可得故障判定区段划分如表 3 所示。

当故障发生在区段 Z8,此时 FI1、FI2、FI7 均上报故障信息,其他故障指示器无故障信息上报。设每个区段发生故障的概率一样, λ 取 0.95, δ 取 0.1。

根据各故障指示器上报故障信息的情况,可得证据结果和各区段发生故障的概率,如表 4 所示。

根据各故障指示器提供的证据,按照第 2.4 节步骤利用 Matlab 计算可得不同区段发生故障的可信度,如表 5 所示。

由表 5 可得,区段 Z8 的可信度值最大,满足决策准则条件,则可判定故障最有可能发生在区段 Z8,与实际情况相符,区段 Z9 的可信度值次之,作为故障发生区段的备选方案。

3.2 信息不健全时的计算分析

如图 5 所示,当故障发生在区段 Z6,FI1、FI2、FI3、FI5 均正常上报故障信息,故障指示器 FI4 漏报故障信息,其他故障指示器也无故障信息上报。仍设每个区段发生故障的概率一样, λ 取 0.95, δ 取 0.1。

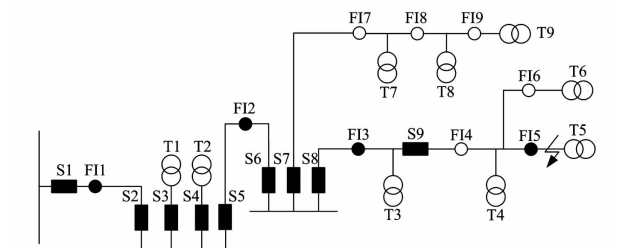


图 5 信息漏报时故障指示器运行情况

表 3 故障判定区段划分情况

区段 Z1	区段 Z2	区段 Z3	区段 Z4	区段 Z5	区段 Z6	区段 Z7	区段 Z8	区段 Z9	区段 Z10
S1, FI1	FI1, FI2	FI2, FI3, FI7	FI3, FI4	FI4, FI5, FI6	FI5	FI6	FI7, FI8	FI8, FI9	FI9

表 4 证据结果和各区段发生故障的概率

故障指示器	是否上报故障信息	证据结果(可疑故障区段)	各区段发生故障的概率
FI1	是	{ Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7, Z8, Z9, Z10 }	$\{\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}\}$
FI2	是	{ Z3, Z4, Z5, Z6, Z7, Z8, Z9, Z10 }	$\{\frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}\}$
FI3	否	{ Z1, Z2, Z3, Z8, Z9, Z10 }	$\{\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}\}$
FI4	否	{ Z1, Z2, Z3, Z4, Z8, Z9, Z10 }	$\{\frac{1}{7}, \frac{1}{7}, \frac{1}{7}, \frac{1}{7}, \frac{1}{7}, \frac{1}{7}, \frac{1}{7}\}$
FI5	否	{ Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z7, Z8, Z9, Z10 }	$\{\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}\}$
FI6	否	{ Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z8, Z9, Z10 }	$\{\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}\}$
FI7	是	{ Z8, Z9, Z10 }	$\{\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}\}$
FI8	否	{ Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7, Z8 }	$\{\frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}\}$
FI9	否	{ Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7, Z8, Z9 }	$\{\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}\}$

表 5 信息健全时不同区段发生故障的可信度

区段 Z1	区段 Z2	区段 Z3	区段 Z4	区段 Z5	区段 Z6	区段 Z7	区段 Z8	区段 Z9	区段 Z10	Θ
0.823%	2.56%	8.641%	2.074%	0.558%	0.179%	0.179%	60.175%	18.775%	6.035%	0.001%

表 6 信息漏报时不同区段发生故障的可信度

区段 Z1	区段 Z2	区段 Z3	区段 Z4	区段 Z5	区段 Z6	区段 Z7	区段 Z8	区段 Z9	区段 Z10	Θ
0.235%	0.731%	2.468%	14.189%	3.820%	76.404%	1.228%	0.664%	0.197%	0.063%	0.001%

表 7 信息误报时不同区段发生故障的可信度

区段 Z1	区段 Z2	区段 Z3	区段 Z4	区段 Z5	区段 Z6	区段 Z7	区段 Z8	区段 Z9	区段 Z10	Θ
20.009%	62.250%	5.929%	1.423%	0.383%	7.662%	0.123%	1.596%	0.473%	0.152%	0.001%

根据第 2 章的处理方法可得每个区段发生故障的可信度如表 6 所示。

由表 6 可得,区段 Z6 的可信度值最大,且满足决策准则条件,则可判定故障最有可能发生在区段 Z6,与实际情况相符,区段 Z4 的可信度值次之,作为故障发生区段的备选方案。

如图 6 所示,当故障发生在区段 Z2,FI1 正常上报故障信息,FI5 误报故障信息,其他故障指示器均无故障信息上报。仍设每个区段发生故障的概率一样, λ 取 0.95, δ 取 0.1。

根据第 2 章的处理方法可得每个区段发生故障的可信度如表 7 所示。

由表 7 可得,区段 Z2 的可信度值最大,满足决策准则条件,则可判定故障最有可能发生在区段

Z2,与实际情况相符。

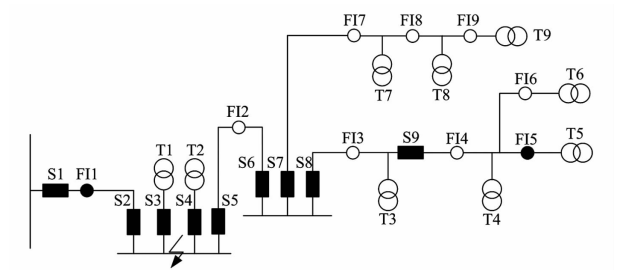


图 6 信息误报时故障指示器运行情况

4 结 语

利用每个故障指示器的故障信息上报情况形成可疑故障区段的证据,然后通过改进的 D – S 证据理论对发生故障的可疑区段进行融合,得到每个区

(下转第 22 页)

农村配电网 10 kV 线路重合闸成功率的影响因素研究

朱丽嫚¹, 高艺文², 李 熠³

- (1. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
3. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要:重合闸是电力系统中提高供电可靠性的一种有效手段。目前,大部分的农村配电网 10 kV 线路都装设有重合闸装置,然而实际运行时重合闸成功率普遍不高。针对此问题,首先总结了重合闸时间整定原则,然后对影响农村配电网 10 kV 线路重合闸成功率的相关因素进行了详细的分析,最后依据短时停电的定义和要求,梳理了几点建议,为电力企业在提高农村配电网 10 kV 线路重合闸成功率方面提供参考。

关键词:农村配电网;重合闸;影响因素;成功率

中图分类号:TM727.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)06-0005-04

Research on Factors Influencing Reclosing Success Rate of 10 kV Lines in Rural Distribution Network

Zhu Liman¹, Gao Yiwen², Li Yi³

- (1. State Grid Sichuan Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Reclosing is the effective way to improve the reliability of power supply in power system. At present, most of 10 kV lines in rural distribution network are equipped with reclosing devices, but the success rate of reclosing is generally not high in actual operation. Aiming at this problem, firstly the reclosing time setting principle is summarized, and then the related factors influencing the success rate of 10 kV line reclosing in rural distribution network are analyzed in detail. Finally based on the definition and requirements of short-time power outages, some suggestions are put forward, which provides a reference for improving the success rate of 10 kV line reclosing in rural distribution network.

Key words: rural distribution network; reclosing; influencing factors; success rate

0 引言

目前,农村配电网发生的故障主要有两类:永久性故障和瞬时性故障。其中瞬时性故障约占故障总数的 80% 以上。当线路发生瞬时故障时,断路器通过过流保护会跳闸,线路处于停电状态,如果线路未装设重合闸装置,线路不再送电,大大影响了供电可靠性。因此重合闸对配电网的持续供电和稳定运行起到重要的作用。

目前,影响重合闸成功率的研究多针对更高电压等级的输电网^[1-6],对农村配电网领域的研究较少。现在大部分的农村配电网普遍装设了重合闸装置但重合成功率却不高。因此有必要对农村配电网重合闸成功率的影响因素进行深入分析和研究。

首先总结了 10 kV 线路重合闸整定原则及相关规定,然后对影响农村配电网 10 kV 线路重合闸成功率的相关因素进行了详细的分析,最后依据短时停电的定义和要求,梳理了几点建议,为电力企业在提高农村配电网 10 kV 线路重合闸成功率方面提供参考。

1 重合闸整定原则及相关规定

1.1 《3 ~ 110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》规定

《3 ~ 110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》DL/T 584 - 2007^[7]对单电源线路的三相重合闸整定时间进行了规定。

根据规程要求,单电源线路的三相重合闸时间应该同时大于短路点断电后电弧的去游离时间以及线路断路器及其操作机构具备再次动作条件的时间。

因此,规程认为单侧电源线路的三相一次重合闸动作时间宜大于 0.5 s,同时为提高线路重合成功率,可酌情延长重合闸动作时间。

1.2 《电力系统继电保护与安全自动装置整定计算》规定

《电力系统继电保护与安全自动装置整定计算》^[8]中对线路单电源供电负荷重合闸整定原则进行了如下规定:

当线路短路故障引起断路器跳闸后,负荷中无法自启动的设备应自动跳闸。而负荷中允许重新带电的设备,则可以在断路器重合成功后恢复供电。重合闸时间的整定主要取决于短路点电弧的去游离时间。用户负荷中不能参加自启动的设备须自动跳闸。允许重新带电的负荷,在断路器重合后恢复供电,重合闸时间主要决定于故障点去游离时间。

因此,在重合闸动作时间的整定方面,可考虑如下两种情况:

1) 对于不对应起动方式,其重合闸动作时间 t_{ch1} 整定为

$$t_{ch1} = t_{xyl} + t_y - t_h \tag{1}$$

式中: t_{xyl} 为故障点电弧消弧及去游离时间; t_y 为裕度,一般可取为 0.1 ~ 0.15 s; t_h 为断路器合闸时间。

2) 对于保护起动方式,其重合闸动作时间还应包括断路器跳闸时间,其具体整定公式为

$$t_{ch2} = t_s + t_{xyl} + t_y - t_h \tag{2}$$

式中, t_s 为断路器跳闸时间。

相关整定示意如图 1 所示,图中 t_{ch2} 是考虑断路器分闸时间的重合闸动作时间。

然而,式(1)和式(2)在使用过程中,却面临故障点电弧消弧及去游离时间 t_{xyl} 难以确定的困难。大多仅能依靠经验,在现场工程中为了提升断路器

重合闸成功率,保证在断路器重合闸后瞬时性故障已经可靠消除,单侧电源线路重合闸动作时间一般取 0.8 ~ 1 s。

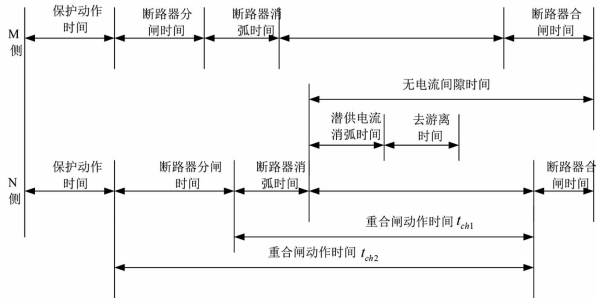


图 1 重合闸整定示意

1.3 小结

根据《3 ~ 110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》DL/T 584 - 2007 和《电力系统继电保护与安全自动装置整定计算》可以发现,考虑到保护动作时间、断路器动作时间以及断路器断口熄弧特性相对固定,10 kV 配电网线路重合闸时间主要与故障点断电熄弧去游离时间紧密相关。如果在断路器重合前,非永久性故障点已经成功熄弧,重合闸操作即可成功,否则重合闸将失败。

根据这一原则,下面将对重合闸成功与否的影响因素进行分析。

2 影响重合闸成功率相关因素

2.1 潜供电流对重合闸影响分析

潜供电流是影响较高电压等级输电网重合闸成功与否的主要因素^[9-11]。对于 10 kV 配电网同杆并架线路可能会因为潜供电流存在影响重合闸动作。

农村配电网线路中存在同杆并架线路时,当某回线路上发生短路故障后,继电保护将故障线路跳开,但同杆并架的另一回线路仍然处于正常运行状态。此时,由于非故障线路与故障线路间的电容和互感,导致故障点电弧电流无法降低至 0,增加电弧灭弧难度。在此状态下,故障点电弧中流过的电流称为潜供电流。由于潜供电流增加了故障点灭弧的难度,延长了故障点灭弧时间,可能导致自动重合闸后故障点绝缘未成功恢复,引发重合闸失败。

然而,依托 PSCAD 仿真软件对 10 kV 线路进行潜供电流计算发现,在典型参数下,5 km 同杆并架 10 kV 线路出现两相或三相短路时,故障线路上潜供电流不到 3 A,感应电压不超过 300 V,难以形成

稳定的弧道,不会对故障点熄弧产生影响。

2.2 异步电动机对重合闸影响分析

文献[12-13]认为配电网末端异步电动机可能会对重合闸成功产生影响,主要有以下两方面原因:

1)当异步电动机失电后,由于其转速无法瞬间到0,电动机将在一段时间内呈现异步发电机状态,向故障点注入电流,影响线路故障点熄弧。

2)由于异步电动机失电残压的存在,电源恢复时可能会引起大的冲击电流,大的冲击电流可能会危及配电线路保护装置的工作可靠性,使继电保护装置误动作,保护跳闸使重合闸重合不成功。

然而,大量调研发现,异步电动机负荷其实对10 kV 配电网线路重合闸成功率影响不大。主要原因因为目前工业电动机大多采用接触器进行投切,对于常见型号的接触器来说,当其电压跌落至45%~55% U_N 时,接触器将出现低压脱扣释放,延长释放时间为15~40 ms。由此可见,当重合闸时间整定在秒级时,负荷电动机早已经脱扣,无法提供短路电流和冲击电流,不会影响重合闸成功率。

2.3 配电系统励磁涌流对重合闸影响分析

当配电系统中变压器空载投运或故障切除后电压恢复时,可能出现数值较大的励磁涌流,其数值可达额定电流6~8倍。

配电线路一般装设有电流速断和定时过流保护。根据三段式电流保护的整定原则,定时过流保护只按照最大负荷电流进行整定,其动作整定值可能小于励磁涌流电流值。特别是在配电线路发生瞬时性故障后,一旦重合闸装置动作,断路器经一定延时后会再次合闸,线路末端断路器在重新上电后,将出现励磁涌流。如果励磁涌流大于定时过流保护整定值,开关将再次跳闸,导致重合闸不成功。

2.4 “滑落性延时故障”对重合闸影响分析

从10 kV 配电线路故障统计发现,线路故障发生的主要原因为两相线路同时与树枝相碰出现的相间短路故障,或者当外力抛掷铁丝等导体滑落于两相导线间产生的相间短路。

此类故障并非永久性故障。然而,与传统瞬时性故障不同,该故障不会因断路器的触头灭弧而自动消失。它需要等待树枝等物体从线路上滑落后,方能消除故障。工业界称其为“滑落性延时故障”。

由于物体具体滑落没有固定时间,一旦线路重合时,物体还没有脱离输电线路,保护装置将视其为

永久性故障,导致线路重合失败。

综上所述,10 kV 配电网线路重合闸成功率主要受到滑落性延时故障的影响,因此需要对其重点分析。

3 重合闸时间整定原则

3.1 重合闸时间整定对滑落性故障的适应性

由于物体具体滑落没有固定时间,难以据其进行精确整定。但是,对于过流保护而言,考虑到保护整定时间0.5 s、断路器分闸时间0.13 s、合闸时间0.2 s,当重合闸整定时间由2 s增加至2.5 s时,允许滑落性故障的延时,将从2.83 s增加至3.33 s,这时对于滑落性延时故障来说,重合成功的可能性就非常大。

对于速断保护而言,忽略保护动作时间,考虑断路器分闸时间0.13 s、合闸时间0.2 s,当重合闸整定时间由2 s增加至2.5 s时,允许滑落性故障的延时,将从2.33 s增加至2.83 s,对于滑落性延时故障的重合成功率也有提升。

3.2 重合闸整定时间的建议

电能质量国际标准IEEE 1159-1995规定:一相或多相电压瞬时跌落到0.1 p. u. 以下的事件统称为中断^[14](interruption)。其中,如果中断时间持续半个周波至3 s称为瞬间中断(momentary interruption);持续时间范围在3 s至1 min的为瞬时中断(temporary interruption);如果中断持续时间超过1 min的事件称为持续中断。

电压短时中断对用户负荷影响可按停电持续时间对负荷的影响划分为4类^[15-16]:1)一般敏感负荷,分钟级的短时停电即暂时中断就会对其造成影响和危害;2)敏感负荷,秒级的短时停电即瞬时中断就会对其造成影响和危害;3)特别敏感负荷(几十至几百毫秒),即瞬间中断就会对其造成影响和危害;4)严格负荷(毫秒级,0.02 s内),即短时停电就会对其造成影响和危害。

根据相关标准,由于重合闸重合的整个过程会造成秒级的短时停电,为了减少对一般敏感负荷和敏感负荷的影响,希望将短时停电控制为瞬间中断的停电事件,所以故障跳闸不应超过3 s,建议重合闸时间整定为2.5 s较为合适。

3.3 延长重合闸整定时限的影响

建议将重合闸时间延长至2.5 s,因此,需要着

重分析延长重合闸整定时限对照明负荷、电动机负荷两类负荷的影响。

1) 对于照明负荷,重合闸时间从1 s提升至2.5 s,均会导致照明中断,但是时间上的差异对人体感受也没有太显著的区别,不会影响负荷的使用感受。

2) 对于电动机负荷,由于农电企业中的电动机都有接触器等低压脱扣装置,反应时间均在3个周波左右,因此当重合闸时间整定在秒级时,负荷电动机早已经脱扣,因此重合闸时间的延时对于电动机负荷而言没有太多的影响。

综上所述,延长重合闸的整定时限,对农电用户而言不会有多大的影响。相反,如果重合时限取得过短,导致短路点绝缘来不及恢复,反而会引起重合闸重合失败,增加停电时间,对用户将造成更多不便。因此,适当地延长重合闸的重合时限,对于提高重合闸的重合成功率以及提高供电的稳定性与可靠性都有非常大的帮助。

4 结 语

1) 从《3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》DL/T 584-2007及重合闸时间整定原则可以发现,考虑到保护动作时间、断路器动作时间以及断路器断口熄弧特性等相对固定,10 kV 配电网线路重合闸时间的整定主要与故障点断电熄弧去游离时间紧密相关。如果在断路器重合前,非永久性故障点已经成功熄弧,重合闸操作即可成功,否则重合闸将失败。但上述标准均未对整定时间作严格要求。

2) 分析表明,励磁涌流、潜供电流以及用户中异步电动机均不会对重合闸成功率产生显著的影响。影响重合闸成功率的主要因素为滑落性延时故障的延时长度。

3) 对于过流保护而言,当重合闸整定时间由2 s增加至2.5 s时,允许滑落性故障的延时将从2.83 s增加至3.33 s。对于速断保护而言,忽略保护动作时间,当重合闸整定时间由2 s增加至2.5 s时,允许滑落性故障的延时也将从2.33 s增加至2.83 s。此时对于滑落性延时故障来说,重合成功的可能性就非常大。

4) 为了减少对一般敏感负荷和敏感负荷的影响,希望将短时停电控制为瞬间中断的停电事件,所以重合闸时间不应超过3 s,建议整定为2.5 s较为

合适。

5) 由于农电企业中的电动机都有启动设备,当重合闸时间整定在秒级时,负荷电动机早已经脱扣,因此重合闸时间的延时对于电动机负荷而言没有太多的影响。同样,对于照明等负荷而言,重合闸时间从2 s提升至2.5 s对人体感受也没有太显著的区别。因此,延长重合闸的整定时限,对农电用户而言不会有多大的影响。相反,如果较短的重合时限引起重合闸重合失败,再进行强送成功,致使停电时间也相应增加,对用户将造成更多不便。

参考文献

- [1] 张保会,雷敏,袁字春. 优化重合闸时间提高网络传输能力[J]. 继电器,1998,26(1):17-22.
- [2] 张保会,袁越,薄志谦. 最佳重合闸时间及其整定计算[J]. 中国电力,1995,28(2):12-16.
- [3] Zhang Bao-hui, Yuan Yu-chun, Chen Zhe, et al. Computation of Optimal Reclosure Time for Transmission Lines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3):670-675.
- [4] 索南加乐,梁振锋,宋国兵. 自适应熄弧时刻的单相重合闸的研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(5):37-41.
- [5] 赵庆明,李斌. 基于电压补偿原理的单相自适应重合闸新型相位判据[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(13):50-54.
- [6] 韩彬,林集明,班连庚,等. 1000 kV 特高压交流试验示范工程单相重合闸研究[J]. 电网技术,2009,33(16):20-23.
- [7] 3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程:DL/T 584-2017[S],1995
- [8] 崔家佩,孟庆炎,陈永芳,等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京:中国电力出版社,1993.
- [9] 周孝信. 超高压输电线路单相重合闸的潜供电弧问题[J]. 电网技术,1977,2(6):4-12.
- [10] 陈天祥,曹荣江. 330 kV 线路潜供电弧自灭特性的研究[J]. 电网技术,1988,13(2):3-12.
- [11] 高山. 特高压输电线路潜供电流及其对重合闸的影响研究[D]. 北京:华北电力大学 2009.
- [12] 邓建国. 三相异步电动机瞬间断电重合闸瞬态分析[J]. 电力自动化设备,2004,24(1):37-41.
- [13] 高吉增,杨玉磊,崔学深. 感应电动机失电残压的研究及其对重合过程的影响[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(4):45-48.

(下转第12页)

基于 10 kV 馈线负荷全转移约束下的变电站全停校验模型研究及应用

叶 璐,王小红,常耀文,韩 阳,唐 朝,张 禹,李卓雯,曾 娜
(国网德阳供电公司,四川 德阳 618000)

摘 要:配电网 10 kV 供电线路可靠性要求越来越高,变电站是否具备全站停电升级改造和检修的条件,缺乏规程参考和理论指导。基于配电网 $N-1$ 安全性准则,提出了变电站所属 10 kV 馈线负荷全转移的定义和条件,建立了变电站全停校验模型,并通过实用算例对模型的准确性和实用性进行验证。实验证明该模型有效且能够为变电站是否具备全停条件提供参考依据,具有借鉴意义。

关键词:配电网;馈线;负荷全转移;全停校验

中图分类号:TM727 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)06-0009-04

Research and Application of Full – stop Check Model for Substation Based on Full Load Transfer Constraint of 10 kV Feeder

Ye Lu, Wang Xiaohong, Chang Yaowen, HanYang, Tang Chao, Zhang Yu, Li Zhuowen, Zeng Na
(State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract:The reliability requirements of 10 kV power supply lines in distribution network are getting higher and higher. Whether the substation has the conditions for upgrading and repairing during power failure of the whole station or not, there lacks the standard reference and theoretical guidance. Based on $N-1$ safety criterion of distribution network, the definition and conditions of full load transfer of 10 kV feeder in substation are put forward, the full – stop check model for substation is established, and the accuracy and practicability of the proposed model are verified through practical examples. The experiments prove that the proposed model is effective, and it can provide reference for whether the substation has full – stop conditions or not, which has reference significance.

Key words:distribution network;feeder;full load transfer;full – stop check

0 引 言

随着人们物质生活水平的不断提高,电网用户侧用电负荷需求也发生了一定改变,人们对电能越来越依赖,可靠性要求越来越高。国家和企业对电网建设和发展思路也随之巨大转变,从以往关注发电、输电向需求侧配电网转变,投入巨大资金对配电网进行升级改造。目前国内配电网大多采用 10 kV 电压等级,通过配电变压器降压后直接面对广大用户。10 kV 配电网是发、输、配电系统的最末端环节,是保障居民正常生活和城市稳定发展的基础,也是电力可靠供应和供电优质服务的实物载体。为保

障配电网安全稳定运行,日常检修和故障处理必不可少。

目前,国内外对于配电网 10 kV 线路及设备的计划检修和故障隔离处理,一般可通过与之相联络的其他 10 kV 线路倒负荷,来实现非检修区域的负荷转移,即线路通过 $N-1$ 安全校验^[1-2]。涉及到变电站长时间全停升级改造或全站故障失压后变电站所属 10 kV 线路的负荷转移,无论是国网公司还是南方电网公司均没有明确的规范要求和校验标准。德阳电网在 2018 年进行 110 kV 德阳站长时间停电改造升级时,就面临了这一突出问题。因此研究基于变电站 10 kV 馈线负荷全转移的全停校验模型,具有非常重要的现实意义。文献[3]借鉴输电

网最大输电能力的概念提出了配电网的相关概念,但依然是基于变电站、主变压器和出线等发生 $N-1$ 时,在实际运行约束下通过站内和站间联络实现负荷损失最小化的目标,且研究的重点是配电网的最大供电能力,对于是否能够在某一个变电站全停的条件下使配电网 10 kV 馈线负荷不受影响,没有做过多研究。文献[4]基于现有馈线互联互供的配电网关系,提出了配电网安全域模型,并运用于多联络的复杂配电网,给出了配电网安全运行区域和 $N-1$ 边界,但并未考虑实际配电网运行过程中,因倒闸操作次数增加而引起的一系列优质服务、安全稳定问题。

下面考虑配电网 10 kV 馈线负荷全转移条件下对变电站全停校验分析,提出了变电站全停校验模型,对变电站是否能够具备全停的条件,给出了明确的答案,具有借鉴意义。

1 馈线负荷全转移的定义及条件

配电网 $N-1$ 安全性准则是配电网规划和运行的重要准则,它规定了在配电网中主变压器或线路发生故障时,线路或主变压器所带负荷可通过与之联络的线路进行转供,即不对外停电。

图 1 为变电站馈线示意图:馈线 1 是常见 10 kV 配电网三联络线路,与之相联络的其他 3 条线路,分别是联络线 1、联络线 2、联络线 3,且馈线 1 与联络线 1 均来自变电站 A。一般情况下,考虑最严重的线路故障,馈线 1 出线开关跳闸,则原线路上负荷只能通过 3 条联络线转供,实现不对外停电的目标。目前,随着城市配电网建设进程的加快,10 kV 配电网中联络线较多,网架结构完善,一般情况下均可通过不超过两次的倒闸操作完成整条 10 kV 线路的负荷转移。但如果变电站 A 全站停电,则与馈线 1 所属变电站相同的联络线 1 将失去联络作用,同时该联络线自身负荷也需通过其他站外联络线实现负荷转移,即变电站 A 所属全部 10 kV 馈线负荷均只能通过其他变电站联络线实现负荷转移,即馈线负荷全转移。

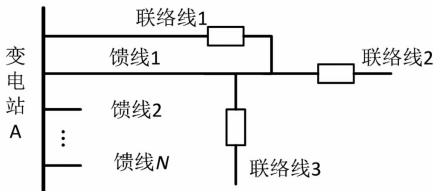


图 1 变电站馈线示意 1

在图 2 所示变电站馈线,图中变电站 A 所属 10 kV 馈线 1,与之相联络的分别是变电站 B、变电站 C 所属 10 kV 联络线 1、联络线 2。考虑极端情况,且暂不考虑 10 kV 馈线 1 的分段方式和网架结构,若变电站 A 全站停电,通过联络线倒负荷方式,在满足联络线 1、联络线 2 不过载且变电站 B、变电站 C 不过载的情况下,馈线 1 上的所有负荷可通过变电站 B、C 转供,从而实现变电站 A 所属所有 10 kV 馈线的负荷全转移。因此根据馈线负荷全转移的定义,可以得出满足馈线负荷全转移的基本条件^[5]:

- 1)该变电站所属所有 10 kV 馈线均存在至少 1 回站间联络线;
- 2)与馈线相连的站间联络线的负荷裕度小于等于需要其转供的负荷大小;
- 3)馈线负荷全转移后,联络线路、主变压器、变电站等不出现过负荷、低电压状态。

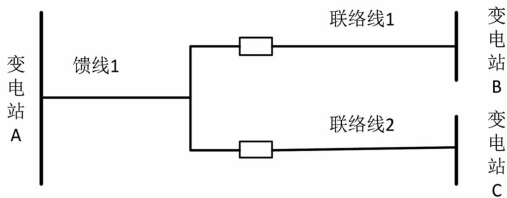


图 2 变电站馈线示意 2

2 变电站全停校验模型

在配电网中,由于受到变电站选址和通道受限的影响,往往需要对已有变电站进行升级改造,以满足长期负荷增长需求;但由于现场施工条件限制和电网安全规程要求,不得不选择全站停电改造,且改造周期较长。以某地市公司 110 kV 变电站为例,停电时间长达 5 个月,在此改造期间,配电网运行压力巨大,能否平稳度过负荷高峰时期,缺乏理论支撑和可行性论证,施工中能否安排全站停电进行升级改造缺乏有效规程参考和指导意义。

根据前面对变电站所属馈线负荷全转移的定义和条件约束,可以建立如下模型:

$$S = S_1 \times S_2 \times \cdots S_N \tag{1}$$

$$S_N = \begin{cases} 1 & f_N \leq \max f_i + \max f_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{2}$$

$$\max f_i = \text{Max } f_i - f_i \tag{3}$$

$$\max f_j = \text{Max } f_j - f_j \tag{4}$$

$$\sum_1^N F_N \leq V_s \tag{5}$$

$$F_N \leq \text{Max } f_N \tag{6}$$

上述模型中: N 为变电站 10 kV 馈线条数; S_N 为同一变电站第 N 条 10 kV 馈线的负荷全转移标识, $S_N = 1$ 时,则该条 10 kV 馈线上负荷能够全部转移; $S_N = 0$ 时,则该条 10 kV 馈线上负荷不能全部转移; f_N 为第 N 条馈线的最大负荷; $\max f_i$ 、 $\max f_j$ 为与第 N 条馈线相联络且负荷裕度最大的两条线路的负荷裕度; $\text{Max } f_i$ 、 $\text{Max } f_j$ 为与第 N 条馈线相联络且负荷裕度最大的两条线路的允许最大负荷; F_N 为负荷转移后联络线路的最终负荷; V_S 为变电站的允许最大负荷; S 为变电站全停校验结果。

式(1)中, S 为变电站所属所有 10 kV 馈线负荷全转移标识的乘积。如变电站任何一条 10 kV 馈线负荷不能全部转移,即其中任一个 $S_N = 0$,则变电站全停校验结果为 0,不能实施全站停电。由此可知:要使 $S = 1$,该变电站所属所有 10 kV 馈线负荷全转移标识均为 1,才能够实现变电站全停下的负荷全转移,即变电站全停通过;当 $S = 0$ 时,该变电站所属 10 kV 馈线不能够实现变电站全停下的负荷全转移,即变电站全停校验不通过。

式(2)约束条件表示变电站第 N 条馈线的最大负荷 f_N 必须小于等于与之相联络且负荷裕度最大的两条馈线的负荷裕度之和。因现场实际倒闸规范要求,这里暂只考虑两条相联络线路,不考虑 3 条以上联络线路的情况。

式(3)、式(4)表示与第 N 条馈线相联络且负荷裕度最大的两条线路的负荷裕度计算方法。

式(5)不等式约束表示当馈线负荷转移后,联络线路所属变电站下所有馈线负荷之和应小于等于变电站允许最大负荷,即变电站不过载。

式(6)不等式约束表示当馈线负荷转移后,联络线路负荷应小于线路允许最大负荷,即线路不过载。

需要声明的是,该模型不考虑变电站、线路的短时过载能力和转供条件下的 $N - 1$ 安全校验。通过该模型的应用,可以为变电站全停进行升级改造提供参考依据。

3 实用算例

图 3 为算例配电网的示意图,是由 4 个 110 kV 变电站和 10 条 10 kV 馈线组成的地区实际配电网

结构模型,为使网络拓扑清晰简化,图中只标出了配电网馈线联络开关位置,未标明馈线分段开关位置。假设所有馈线均采用同一种导线型号,所有馈线允许最大负荷均为 8 MW,同时负荷在馈线上均匀分布,且暂不考虑分段开关位置对联络线路转供能力的影响。表 1 给出了本算例配电网的变电站容量参数,表 4 给出了本算例配电网的馈线最大负荷及联络关系。从图 3 中可以看出馈线 a_1 、 b_3 为三联络线路,馈线 a_2 、 b_2 、 c_1 、 c_2 、 d_1 、 d_3 为两 联络线路,馈线 b_1 、 d_2 为单联络线路,且馈线 b_2 、 b_3 、 d_3 存在站内联络的情况。

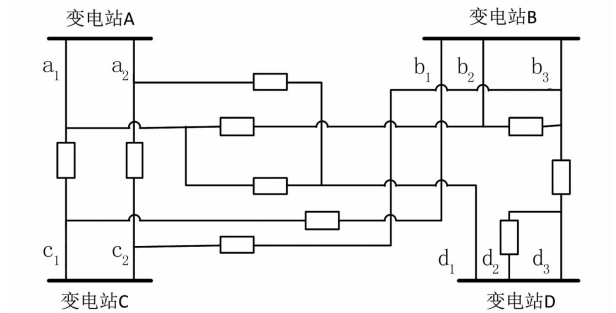


图 3 算例配电网

表 1 变电站容量参数

变电站名称	容量/MVA
变电站 A	20
变电站 B	40
变电站 C	40
变电站 D	48

表 2 馈线最大负荷及联络关系

馈线名称	最大负荷/MW	联络线名称
a_1	4.0	b_2 、 c_2 、 d_1
a_2	3.2	c_1 、 d_1
b_1	4.0	c_2
b_2	5.6	a_1 、 b_3
b_3	5.2	b_2 、 c_1 、 d_3
c_1	5.2	a_2 、 b_3
c_2	6.8	a_1 、 b_1
d_1	4.8	a_1 、 a_2
d_2	0.8	d_3
d_3	0.8	b_3 、 d_2

将表 1 和表 2 作为输入量,带入第 2 节所建立的变电站全停校验模型中,无需迭代计算,很容易可以计算出该配电网所有馈线最大负荷运行时馈线负荷全转移约束条件下的变电站校验通过结果,如表 3 所示。

表 3 变电站全停校验结果

变电站名称	校验结果
变电站 A	通过
变电站 B	不通过
变电站 C	通过
变电站 D	不通过

从上述校验结果可以看出,变电站 A、C 通过全停校验,即在该配电网正常运行方式下,变电站 A、C 全站停电检修时,该地区配电网能实现不对外停电。变电站 B 不通过变电站全停校验,即当前网络状况下,若变电站 B 全站停电检修,存在转供线路过载风险,建议后期加强 10 kV 馈线站间联络的投资建设,使其具备全站长时间停电检修改造的能力。变电站 D 不通过变电站全停校验,主要原因是馈线 d₂ 属于站内单联络线路,不满足模型约束条件。

需要注意的是,所提出的变电站全停校验模型,线路运行参数均选择所有线路各自的最大负荷,负荷转供参考电力行业有关 $N-1$ 校验规则,即不超过两次倒闸操作。实际工作中,由于地区负荷特性不同,在考虑同时最大负荷时,由于针对的是长时间的停电转供,因此考虑的只是理论上的最严重情况。实际电网运行中的地区最大线路负荷,还存在负荷同时率、长期特定运行方式下的 $N-1$ 安全性等问题;且电网运行方式多种多样,若不受倒闸操作引起的停电次数限制,对于站间联络线路较多的线路比负荷转供较联络线路较少的线路更具优势,安全性、可靠性也将更高。

4 结 语

考虑 10 kV 馈线负荷全转移约束下的变电站全停校验,对于制定变电站全停检修负荷转供方式具有重要参考价值,也是制定变电站检修策略的重要依据。给出了馈线负荷全转移的定义和约束条件,并建立了该约束条件下的全站停电校验模型,通过

算例验证了模型的准确性和实用性,为配电网馈线站间联络建设提供了可靠依据,对进一步提升配电网供电服务质量打下了坚实基础,具有借鉴意义。目前该模型已经成功应用于德阳地区配电网标准化改造的项目储备方案审查和策略制定中,并取得了良好的效益,具有推广价值。

参考文献

[1] 肖峻,谷文卓,郭晓丹,等. 配电系统供电能力模型[J]. 电力系统自动化,2011,35(24): 47-52.

[2] 王成山,罗凤章,肖峻,等. 基于主变互联关系的配电系统供电能力计算方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(13):86-91.

[3] 谷文卓. 配电网最大供电能力的定义、模型与计算方法[D]. 天津:天津大学,2012.

[4] 肖峻,苏步芸,贡晓旭,等. 基于馈线互联关系的配电网安全域模型[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(20):36-44.

[5] 韦斌,杨丰任,曹松. 配电网合环转供电研究及辅助软件开发[J]. 四川电力技术,2016,39(3):67-71.

作者简介:

叶 璐(1999),本科、助理工程师,从事配电网运行、检修及系统维护等管理工作;

王小红(1988),本科、助理工程师,从事配电网运行、检修及系统维护等管理工作;

常耀文(1991),助理工程师,从事配电网运行、检修及配电网故障抢修等管理工作;

韩 阳(1988),工程师,从事配电网线路、设备运行管理、检修维护等工作;

唐 朝(1984),工程师,从事配电运检分析管理、配电自动化管理等工作;

张 禹(1985),工程师,从事配电网运维检修管理工作;

李卓雯(1986),硕士、工程师,从事配电网运检计划管理工作;

曾 娜(1987),工程师,从事配电网生产技改大修项目管理工作。

(收稿日期:2018-07-06)

(上接第 8 页)

[14] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality:IEEE Std 1159-1995[S],1995.

[15] 李天友,赵会茹,乞建勋,等. 短时停电及其影响分析[J]. 中国电力,2012,45(5):48-51.

[16] 张林利,李建修,刘合金,等. 配电网混合线路重合闸问题研究[J]. 山东电力技术,2016,43(6):77-79.

作者简介:

朱丽媛(1968),工程师,主要研究方向为电力系统自动化;

高艺文(1989),工程师,主要研究方向为配电网自动化与继电保护;

李 熠(1981),硕士、工程师,主要研究方向为变电站集中监控。

(收稿日期:2018-08-16)

基于 DIGSILENT 建模的 10 kV 中压线路供电半径优化研究

刘代刚¹,王震泉¹,张文嘉²

(1. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司,江苏 南京 211102;
2. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院,江苏 南京 210008)

摘要:从四川省低密度负荷区低电压问题治理现状出发,以《配电网规划设计技术导则》10 kV 中压线路的相关规范为基础,采用 DIGSILENT 软件建模、仿真了 10 kV 架空线路不同线径,不同负荷量下的末端电压,进而推导出不同线径型号在不同负荷结构下的合理供电半径。相关研究成果可以作为现有 10 kV 架空线路供电半径相关标准的细化补充。

关键词:低密度负荷区;DIGSILENT 建模;10kV 架空线路;合理供电半径

中图分类号:TM715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)06-0013-05

Research on Optimization Model for Power Supply Radius of 10 kV Medium – voltage Lines Based on DIGSILENT

Liu Daigang¹, Wang Zhenquan¹, Zhang Wenjia²

(1. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co. ,Ltd. ,Nangjing 211102, Jiangsu, China;
2. State Grid Jiangsu Economic Research Institute, Nangjing 210008, Jiangsu, China)

Abstract:Preceeding from the current situation of low voltage problem in low density load area in Sichuan province, and based on the relevant specifications of 10 kV medium – voltage line in "The Guide of Planning and Design of Distribution Network", the modeling and simulation of terminal voltage with different wire diameter and different load capacity of 10 kV overhead lines are carried out with DIGSILENT software, and thus the reasonable power supply radius when hanging different loads is derived. The related research results can be used as a detailed supplement to the existing standards for power supply radius of 10 kV overhead line of State Grid Corporation of China.

Key words:low density load area; DIGSILENT modeling; 10 kV overhead line; reasonable power supply radius

0 引言

10 kV 中压线路承担着配送电能的作用,是连接 35 kV 变电站和居民用户的纽带。进行 10 kV 线路规划并计算其在不同状况时的供电半径,可提高配电网工程建设项目的投资效益,有效解决由于线路选型和供电距离过长等因素导致的居民电能质量问题,从根本上改善中国配电网使用寿命短、供电不可靠的现状。

10 kV 架空线路供电半径的适宜取值规范尚未统一。文献[1]归纳了按经济电流密度、按年最低运行费用等确定供电半径的方法,但这些方法需要

考虑的因素过于复杂,且没有考虑区域负荷的实际分布状况。文献[2]建立了供电半径未知情况下的电网结构规划模型和单位面积供电区域年费用目标函数,并以电压允许偏差为约束条件求解最优供电半径,但由于对模型进行了很大程度的简化导致计算的最终结果存在很大误差。现有国家电网公司标准^[3]从供电区域分类的角度对供电半径进行区分,针对低密度负荷区——D、E 类供电区域指出:“10 kV 线路供电半径应满足电压质量的要求,D 类不宜超过 15 km,E 类供电区域供电半径应根据需要经计算确定”,其所确定的低密度负荷区供电半径及导线截面积标准比较笼统。

下面以 D、E 两个区域作为重点研究对象,在四

川省中江、松潘等地区进行了实地调研,从负荷分布情况出发,以电压质量作为评估依据,采用 DIGSILENT 搭建了低密度负荷区的单电源辐射状^[4]配电网拓扑模型,并以此为基础进行配电网不同线径型号、不同负荷量的潮流仿真计算,在文献[3]框架内进一步得出低密度负荷区 10 kV 中压线路的细化标准。

1 四川省低密度负荷区 10 kV 线路负荷分布状况调研

按照国家电网公司供电区域划分标准^[3]及要求:四川省内 D 类供电区主要指以农业生产为主的农村地区;E 类供电区主要指四川省内藏区的高原农牧区;同时定义平均负荷密度 < 1 MW/ km² 的地区为低密度负荷区。因此,四川省低密度负荷区应包括 D 类供电区的部分乡镇和全部 E 类供电区。

基于对全川经济、文化、政治等各项指标数据的分析,考虑地区代表性和客户配合程度等客观因素,选定四川省阿坝州某牧区县和德阳某农业县作为四川低密度负荷试点地区,并在上述试点区域进行 10 kV 线路负荷分布状况调研。

调研过程通过咨询相关运维人员并结合实地勘察,明确试点区域供电公司所辖各条 10 kV 出线的负荷分布状况。试点地区牧区县所属供电公司下辖 13 个 35 kV/ 10 kV 变电站,共 38 回 10 kV 出线;农业县所属供电公司下辖 16 个 35 kV/10 kV 变电站,共 62 回 10 kV 出线。调研结果显示中压线路按 3 段(3 支线)考虑时,试点地区主要存在 4 种典型的负荷分布状况,分别为:①中压负荷均匀分布在 10 kV 主干线的 3 个分段上,每一分段所带负荷占负荷总量的 33.3%;②10 kV 主干线上挂接两条支线,支线所带负荷依次(从靠近变电站一侧开始)占负荷总量的 33.3%、66.6%;③10 kV 主干线上挂接 3 条支线,支线所带负荷依次(从靠近变电站一侧开始)占负荷总量的 10%、20%、70%;④10 kV 主干线上挂接一条支线,负荷全部集中于线路的末端。

试点地区 10 kV 中压线路不同负荷分布方式所占比例情况如表 1 所示。

试点地区	负荷分布方式				
	第①种	第②种	第③种	第④种	其他
	/%	/%	/%	/%	/%
牧区县	11	14	13	57	5
农业县	15	18	10	53	4

2 四川省低密度负荷区配电网建模及仿真

2.1 基于 DIGSILENT 的四川省低密度负荷区配电网拓扑模型的搭建

利用 DIGSILENT 依次搭建了代表①、②、③、④四类负荷分布状况的典型单电源辐射状配网拓扑模型如图 1 至图 4 所示。

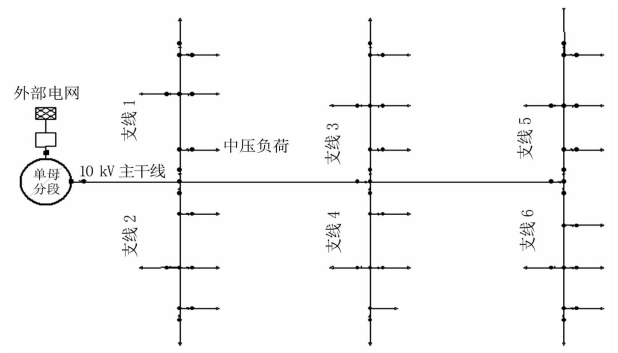


图 1 第①种负荷分布方式

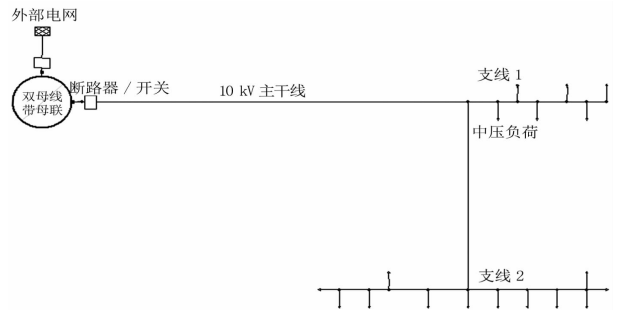


图 2 第②种负荷分布方式

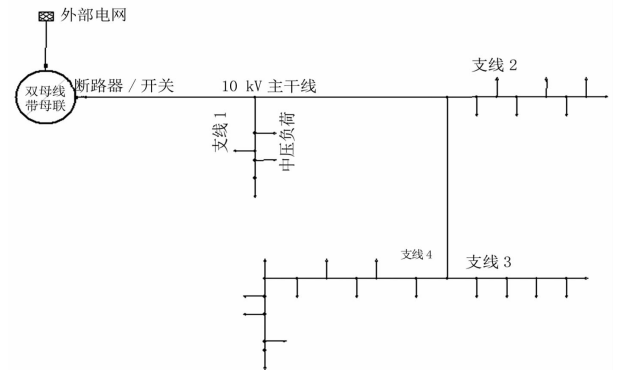


图 3 第③种负荷分布方式

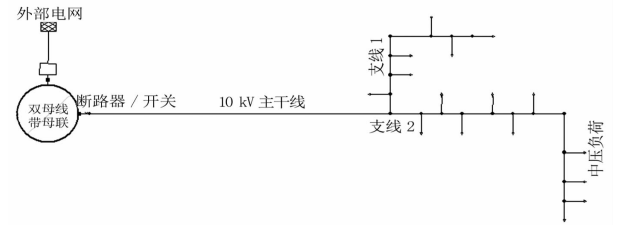


图 4 第④种负荷分布方式

表 2 4 种典型负荷分布方式在不同供电半径下的线路末端节点电压

第①种		第②种		第③种		第④种	
供电半径/km	末端电压/kV	供电半径/km	末端电压/kV	供电半径/km	末端电压/kV	供电半径/km	末端电压/kV
13.5	9.70	13.7	9.72	14.6	9.72	9.8	9.72
14.5	9.62	14.8	9.66	15.6	9.66	10.4	9.66
15.5	9.58	15.4	9.6	16.6	9.60	11.5	9.60
16.5	9.54	16.7	9.54	17.6	9.54	12.6	9.54
17.5	9.45	17.8	9.48	18.6	9.48	13.4	9.48
18.5	9.40	18.9	9.44	19.6	9.44	14.5	9.44
19.5	9.35	19.5	9.35	20.6	9.35	15.6	9.35
20.5	9.33	20.7	9.33	21.6	9.33	16.7	9.33
21.5	9.33	21.9	9.32	22.6	9.32	17.4	9.32
22.5	9.32	23.9	9.30	23.6	9.30	18.5	9.30
23.5	9.31						
24.2	9.30						

2.2 4 种拓扑模型下仿真调整方式的确定

在单电源辐射状典型配电网拓扑模型的基础上,通过调整中压负荷相关参数使其按照 4 种典型负荷分布状况分布在拓扑结构的各支路和节点处,然后根据架空裸导线的额定载容量和中压线路的实际负荷量设定范围,将中压负荷量分为0.5 MW、1 MW、1.5 MW、2 MW……6 MW 等 12 个比较典型的负荷挡位^[5]并进行仿真。在不同的线径型号下,连续调节拓扑模型中的中压主干线路长度,观察线路末端节点电压幅值,当电压幅值下降至 9.3 kV^[6]时,其对应的供电半径即为不同型号线径中压线路相应的最大允许供电半径。

以 LGJ-240 为例,在 4 种典型负荷分布状况下,中压线路总负荷 1 MW 情形下的典型单电源辐射状配电网拓扑模型供电半径与线路末端节点电压的对应关系如表 2 所示。

由表 2 可知,在第①种典型负荷分布下,当供电半径增至 24.2 km,线路末端电压为规定临界电压 9.30 kV,由此确定 LGJ-240 架空线在总负荷为 1 MW 情况下的中压线路最大允许供电半径为 24.2 km。同理可得,在第②种、第③种、第④种典型负荷分布下的中压线路最大允许供电半径分别为 23.9 km、23.6 km、18.5 km。

2.3 LGJ-240 线型在 4 种典型配网拓扑模型下的仿真结果

基于以上 4 种典型 DIGSILENT 的单电源辐射状配网拓扑模型,以类似的方法依次研究了 0.5 MW 至 6 MW 负载水平下,中压线路末端电压幅值随供电半径的变化趋势,得出 LGJ-240 线型在上述各个典型负荷分布状况下,线路首端电压为 10.2 kV,末端电压为 9.3 kV 时线路最大允许供电半径,具体情况如表 3 所示。

表 3 LGJ-240 架空线在 4 种典型负荷分布及不同负载率下的最大允许供电半径

负荷/MW	供电半径/km			
	第①种	第②种	第③种	第④种
0.5	25.3	25.0	24.5	20.0
1.0	24.2	23.9	23.6	19.2
1.5	23.1	22.8	22.1	17.8
2.0	21.8	21.3	20.6	16.1
2.5	20.4	19.6	18.7	14.3
3.0	18.6	17.2	16.5	12.3
3.5	16.4	14.8	14.0	11.3
4.0	14.8	13.0	10.8	9.6
4.5	12.6	11.2	8.5	8.1
5.0	11.2	9.3	6.4	6.0
5.5	9.5	7.3	5.5	5.2
6.0	8.8	6.0	4.3	3.8

可得出4种典型负荷分布状况时,LGJ-240 架空裸导线的最大允许供电半径随中压线路负荷的变化趋势,具体情况如图5所示。

由图5可知:在不同典型负荷分布状况中,随着中压线路上挂接负荷量的增加,LGJ-240 线型中压线路的最大供电半径迅速降低。同时,在相同负荷量下,4种典型负荷分布情况下的最大允许供电半径由小到大依次为第④种、第③种、第②种、第①种;相同的负荷量下,负荷分布状况为“负荷集中于线

路末端”情况时,最大允许供电半径将最小。

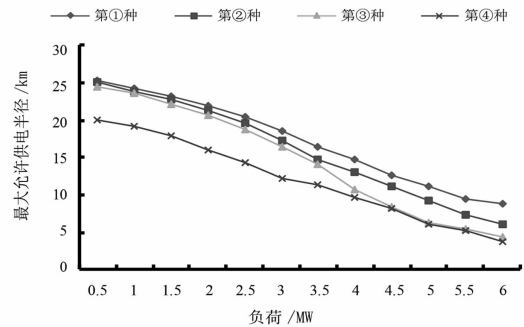


图5 最大允许供电半径-负荷曲线

表4 不同线径及负荷下的最大允许供电半径

单位:km												
负荷量 /MW	LGJ-70				LGJ-95				LGJ-120			
	①	②	③	④	①	②	③	④	①	②	③	④
0.5	12.6	11.5	9.5	8.7	18.6	16.8	13.3	11.4	22.0	20.4	17.2	15.2
1.0	11.5	10.3	8.4	8.2	17.2	14.9	12.8	10.9	20.0	18.2	16.8	14.2
1.5	10.6	9.1	7.2	7.1	16.0	13.0	11.0	9.4	17.6	15.9	14.8	12.5
2.0	9.8	8.0	5.7	5.4	14.2	11.2	9.0	8.2	15.4	13.7	12.8	11.2
2.5	9.1	6.8	4.3	3.8	12.3	9.3	7.3	6.7	13.1	11.5	10.6	9.4
3.0	8.2	5.6	3.4	3.0	10.3	7.4	5.4	5.2	11.2	9.3	8.5	7.2
3.5					7.8	5.5	4.0	3.4	9.8	7.0	5.8	5.1
4.0									7.5	4.8	3.8	3.2
4.5												
5.0												
5.5												
6.0												

负荷量 /MW	LGJ-150				LGJ-185				LGJ-240			
	①	②	③	④	①	②	③	④	①	②	③	④
0.5	22.5	22.0	20.4	17.2	23.3	22.9	22.3	19.0	25.3	25.0	24.5	20.0
1.0	21.0	19.9	19.4	16.3	21.4	21.0	20.6	17.3	24.2	23.9	23.6	19.2
1.5	19.5	17.8	17.6	14.5	20.0	19.5	19.0	15.6	23.1	22.8	22.1	17.8
2.0	18.2	16.7	15.9	12.3	18.9	17.1	16.2	13.9	21.8	21.3	20.6	16.1
2.5	15.9	14.5	13.6	10.8	16.4	15.1	14.7	12.2	20.4	19.6	18.7	14.3
3.0	14.2	11.7	11.2	8.8	14.4	13.2	12.9	10.4	18.6	17.2	16.5	12.3
3.5	11.8	9.4	8.5	6.7	13.2	11.8	11.3	8.7	16.4	14.8	14.0	11.3
4.0	10.0	7.3	5.5	5.0	11.6	10.2	9.7	7.0	14.8	13.0	10.8	9.6
4.5	8.5	5.2	3.5	3.2	9.8	7.3	6.9	5.3	12.6	11.2	8.5	8.1
5.0					8.1	5.4	4.0	3.6	11.2	9.3	6.4	6.0
5.5									9.5	7.3	5.5	5.2
6.0									8.8	6.0	4.3	3.8

3 典型中压线径型号在 4 种典型负荷分布状况下的仿真结果

以上述相同的方法可以依次研究得出 LGJ - 70、LGJ - 95、LGJ - 120、LGJ - 150、LGJ - 185、LGJ - 240 等典型农网中压线径型号在 4 种典型负荷分布状况下,其最大允许供电半径随不同中压线路负荷的变化趋势,具体情况如表 4 所示。

在低密度负荷区配电网工程中,涉及到中压线路的选型应明确低密度负荷区中压线路总负荷水平及负荷的整体分布状况,综合考虑区域发展阶段及项目经济效益和安全性,根据表中的相关数据,确定低密度负荷区的中压架空线路的选型与供电半径。

由表 4 可知,在相同负荷量和架空线型号的情况下,第④种配网拓扑模型即“负荷全部集中于 10 kV 中压线路的末端”时最大允许供电半径最小,即在该种情形下线路输送电能的能力最弱,认为是“木桶效应”中的“短板”,该短板将直接决定线路末端电压质量是否合格。因此,参考第④种配网拓扑模型下的最大允许供电半径进行中压架空线路的选型将不会出现中压线路末端低电压问题,这里将该供电半径定义为“合理供电半径”,不同线径及负荷下的合理供电半径具体情况如表 5 所示。

表 5 不同线径及负荷下的合理供电半径

负荷量 /MW	单位:km					
	LGJ - 70	LGJ - 95	LGJ - 120	LGJ - 150	LGJ - 185	LGJ - 240
0.5	8.7	11.4	15.2	17.2	19.0	20.0
1.0	8.2	10.9	14.2	16.3	17.3	19.2
1.5	7.1	9.4	12.5	14.5	15.6	17.8
2.0	5.4	8.2	11.2	12.3	13.9	16.1
2.5	3.8	6.7	9.4	10.8	12.2	14.3
3.0	3.0	5.2	7.2	8.8	10.4	12.3
3.5		3.4	5.1	6.7	8.7	11.3
4.0			3.2	5.0	7.0	9.6
4.5				3.2	5.3	8.1
5					3.6	6.0
5.5						5.2
6.0						3.8

4 结 语

国家电网公司《配电网规划设计技术导则》^[3]指出:D 类供电地区 10 kV 线路供电半径不宜超过 15 km;E 类供电地区 10 kV 线路供电半径应根据需要经计算确定。前面从四川省低密度负荷区低电压问题治理现状出发,通过基于 DIGSILENT 软件的建模与仿真,对该导则 D、E 两类低密度负荷区 10 kV 中压线路的相关规范进行了更为细化的研究,得出如下结论:

1)低密度负荷区 10 kV 线路的最大供电半径受到负荷分布状况的显著影响,居民负荷越集中于线路的末端,最大供电半径越小。

2)在绝对负荷量相同的情况下,导线截面越大,最大供电半径越长;当负荷总量趋于各型号导线的额定载容量时,不同型号导线的最大供电半径变化不明显。

3)低密度负荷区 10 kV 中压线路钢芯铝绞线 LGJ - 70 的合理供电半径最小,其不宜超过 8.7 km; LGJ - 240 的合理供电半径最大,其不宜超过 20 km。

参考文献

[1] 夏先文. 关于农网 10 kV 线路供电半径的探讨[J]. 黑龙江电力技术, 1987(6):48 - 50.

[2] 柳占杰, 许跃进. 基于电压制式的电网最优供电半径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19):87 - 91.

[3] 国家电网公司. 配电网规划设计技术导则: Q/GDW 1738 - 2012[S], 2012.

[4] 张宁, 马孝义, 李可, 等. 农村辐射状配电网的优化方法[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012 (3):220 - 228.

[5] 乐欢, 王主丁, 吴建宾, 等. 中压馈线装接配变容量的探讨[J]. 华东电力, 2009, 37(4):586 - 588.

[6] 农村电网建设与改造技术导则: DL/T 5131 - 2001 [S], 2001.

作者简介:

刘代刚(1986), 硕士、工程师, 主要从事电力系统运行与控制、配电网规划设计及等方面的研究。

(收稿日期:2018 - 10 - 17)

基于串补技术的配电网电压改善特性分析及应用

李 磊,唐 朝,范福强,汪辰珏,全 翾,张 禹,李卓雯,曾 娜
(国网德阳供电公司,四川 德阳 618000)

摘要:伴随经济的高速发展,人们对优质电能的需求越来越高,然而目前配电网线路仍存在低电压问题,不能满足正常供电。针对现有电压调节方式的弊端,提出了将串补技术用于配电线路解决低电压问题。通过对串联电容补偿技术工作原理的分析,研究了在电压调节中影响串补技术实施效果的主要因素,结合实际案例进行仿真,分析各因素在配电线路电压调节中的作用并提出合理化建议,以实际工程应用证明串补技术在电压调节中的有效性。
关键词:配电网;串补技术;因素;调压
中图分类号:TM72 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)06-0018-05

Analysis on Voltage Improvement of Distribution Network Based on Series Compensation Technology and Its Application

Li Lei, Tang Chao, Fan Fuqiang Electric, Wang Chenjue, Quan Xuan, Zhang Yu, Li Zhuowen, Zeng Na
(State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract: With the rapid development of economy, the demand for high quality electric energy is getting higher and higher. However, at present there are still low voltage problems in distribution network, which cannot meet the normal power supply. Aiming at the disadvantages of the existing voltage regulation mode, the use of series compensation technology in distribution network with low voltage problems is proposed. Based on the analysis of working principle of fixed series capacitor technology, the main factors affecting the implementation effect of fixed series capacitor technology are studied. With the simulation of practical cases, the effect of each factor on voltage regulation of distribution lines is analyzed and the rationalization proposals are put forward. The effectiveness of series compensation technology in voltage regulation is proved by practical engineering application.
Key words: distribution network; series compensation technology; factor; voltage regulation

0 引 言

随着社会经济的飞速发展,中国近年来的用电需求提升迅速,配电网架不断扩大,尤其是农村用电负荷的增加,也对优质的供电电能提出了新的要求。然而,中国配电网建设滞后于经济建设,其网架薄弱,线径小,供电半径长(尤其是农网线路),配电变压器分布广、数量多,且主要集中在线路后端^[1]。往往导致线路末端电压低,供电质量差。

对于配电线路后端电压降问题,主要采取的措施有:加强变电站建设投入以缩短配电线路供电半径、更换配电线路大直径导线、利用配电变压器分接头进行调压、采用并联电容无功补偿等措施^[2-3]。

然而新建变电站造价昂贵,建设周期长,经济性差;更换导线对降低线路电感带来的低电压效果不大,且停电时间长、投资大,不利于目前的优质服务要求;经常使用的第3种方法,固定几挡调节,可调范围小,不能补偿无功功率,无法彻底解决整条线路的电压降问题;并联无功补偿装置随电压有“逆向”特性,调节速度慢,需要安装的容量大^[4-5]。

从技术原理上讲,串联补偿技术对于长距离、大负荷、低功率因素和大电压闪变的配电线路的低电压治理具有技术上的先进性,主要体现在对线路无功具有正补偿、无时延、高效率(与并联补偿比较可以用较小的电容量发挥更高的补偿效果),与传统的补偿技术和调压技术相比,更加高效而经济^[6-9]。从国内外实际应用情况看,串补技术是一项有效解

决长距离大负荷线路低电压问题、提高线路功率因素、减小线路损耗的新的无功补偿技术,是对传统补偿技术的完善和补充。

从串联无功补偿技术原理入手,阐述串补技术在配电网中改善电压的基本原理,分析影响串补技术电压调节的影响因素,结合实际案例仿真分析各因素对配电网串补调压的影响,提出工程实施合理化建议,最后以工程实施案例证明串补技术在配电网调压中的有效性。

1 串补技术电压调节原理

串补技术最早应用在中国的输电线路中^[10-12],该技术能显著提高大容量、远距离输电线路的利用效率,促进电网的稳定运行水平,降低输电损耗。将串补技术引用到配电网中,同样可以解决配电网电压问题^[11-12],不仅可以调节过电压或低电压至合格电压水平内,同时可以提高线路的功率因素降低线路损耗。

对于配电网,相对于输电线路输送距离较短,可以忽略波过程的影响,同时还可以忽略对地电容的影响,此时,配电网可以等效为线路电阻和电抗,其等效电路如图 1 所示。

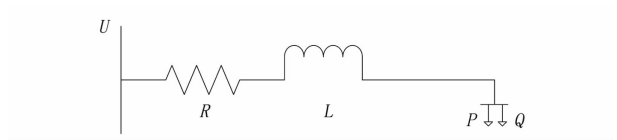


图 1 配电网等效原理

此时,配电网首末两端电压降为

$$U - U' = \frac{PR + QX_L}{U} \tag{1}$$

式中: P 、 Q 为线路负载有功功率和无功功率; U 为线路首端电压。可以看出,在线路负载一定的条件下,线路末端电压主要由线路电阻 R 和电抗 X 确定,且线路电抗 X 往往大于电阻 R ,因此,降低电抗 X 能有效解决低电压问题。

串补技术即是在配电网中串联电容,串联电容后配电网等效电路如图 2 所示。

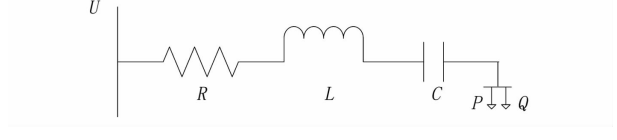


图 2 配电网串联补偿等效原理

则此时线路的阻抗由电阻、电抗和容抗组成,则配电网首末两端电压降为

$$\begin{aligned} U - U' &= \frac{PR + Q(X_L - X_C)}{U} \\ &= \frac{PR + QX_L}{U} - \frac{QX_C}{U} \end{aligned} \tag{2}$$

式中, X_C 为串补电容器容抗。

串联电容的加入,补偿了感抗,有效降低了整个线路等效电抗,从而减小了电压降。

由式(2)可得

$$U' = U - \frac{PR + QX_L}{U} + \frac{QX_C}{U} \tag{3}$$

式中, $\frac{QX_C}{U}$ 即为串联电容的电压提升量,从而达到电压调节的作用。

2 串补技术主要影响因素

由式(3)可得

$$\begin{aligned} U' &= U - \frac{PR + Q(X_L - X_C)}{U} \\ &= U - \frac{PR + QX_L(1 - k)}{U} \\ &= U - \sqrt{3}I_L(R\cos\varphi + X_L(1 - k)\sin\varphi) \end{aligned} \tag{4}$$

式中: I_L 为线路电流; k 为串补补偿度,是串入电容容抗与线路电抗的比值,即:

$$k = \frac{X_C}{X_L} \times 100\% \tag{5}$$

可以看出,串补装置的电压补偿效果与负荷电流有关:当线路负荷重时,电流值大,电压补偿越高;线路负荷较轻时,电流值小,电压补偿较低。因此,串联补偿电容装置不会出现电路轻载导致的过补偿情况,也不会出现电路重载时补偿不够的现象。

综上,影响串联补偿装置主要补偿效果的因素有:线路负荷、功率因数、阻抗值和补偿度。阻抗值和导线截面积、导线长度有关,从前面讨论可知,更换大直径导线存在投资大、停电时间长且效果不大的缺点。因此当配电网导线截面积一定时,只需考虑串联补偿装置的安装位置对补偿效果的影响。

3 串补技术影响因素分析

以德阳供电公司某 10 kV 配电网为例进行仿

真分析。该线路供电半径长、负荷重,线路总长度为18 km,其中主线为 JKLYJ - 240,也包括 JKLYJ - 185 和 JKLYJ - 150,最大负荷为 4.2 MVA,功率因数为 0.85。

当串联补偿容抗 $X_c = 0$ 时,线路各节点电压如图 3 所示,可知,线路电压随着线路长度的增加而不断降低。

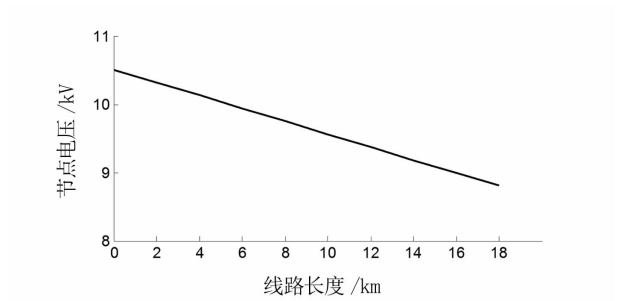


图 3 电压随线路长度的变化曲线

当负荷功率分别为 2 MVA、4 MVA、6 MVA,功率因数为 0.85, $X_c = 0$ 时,串补装置处节点电压分别为 9.57 kV、8.89 kV、8.19 kV,若加入补偿度 $k = 2.25$ 的补偿电容时,补偿点电压分别提升 1.272 kV、1.591 kV、1.668 kV。结果如图 4 所示:容量与电流的平方成正比,而串联电容器补偿的电压与线路电流成正比。因此,当线路容量增大时,电流增大,补偿的电压也随之增大。这就是串补的负荷自适应特性,也是其他无功补偿均不具备的特性。

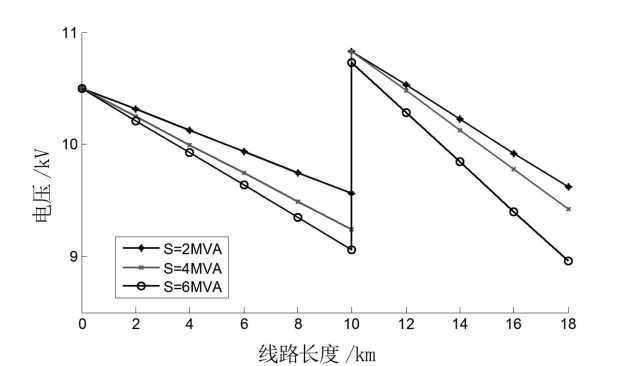


图 4 不同线路负荷下电压随线路长度的变化曲线

当负荷功率为 3 MVA,补偿度 $k = 2.25$,功率因数分别为 0.8、0.9、0.95 时,结果如图 5 所示。可以看出,线路功率因数越小,补偿电压越大。这是因为加入的串联电容在补偿线路感抗的同时,也补偿一部分负荷感抗,提高了功率因数。对于负荷功率因数较低的线路,其电压补偿效果就更为明显。

当负荷功率为 3 MVA,分别在线路的两个点加

装串联补偿电容,比较不同的补偿度对电压的影响,结果如图 6 所示。在两个位置安装串联补偿装置,均能在该处有效提升电压,但不同的安装位置,串补后电压调节的效果差别较大,因此在具体实施工程中,因合理选择安装位置,确保全线电压合格。

另外,在同一位置采用不同补偿度的串补装置,调压结果也不同,线路长度越大,串联电容容抗越大,补偿电压值就越大。若串入电容容抗较大,可能造成调节后电压超过额定电压的上限范围。

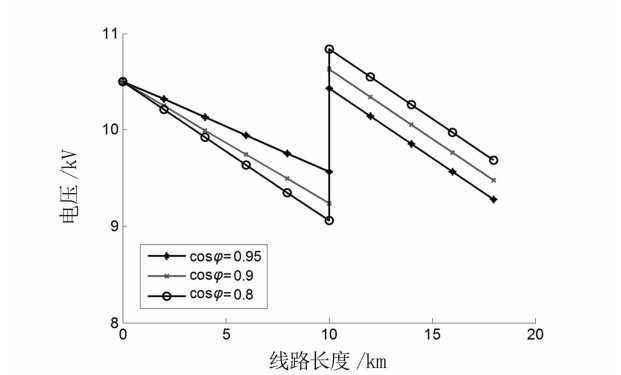


图 5 不同功率因数下电压随线路长度的变化曲线

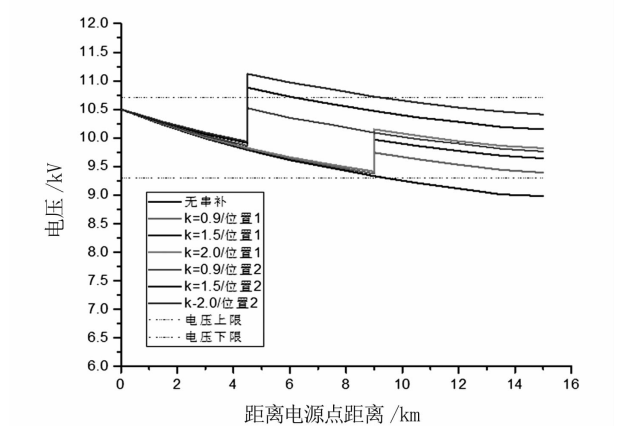


图 6 不同安装位置、不同补偿度下电压随线路长度的变化曲线

采用电容器串联补偿技术能有效提高线路末端电压,达到调压目的,特别是对功率因数较低、负荷波动较大的线路具有显著的效果。根据以上分析可知,影响串补技术效果的因素中,线路阻抗、线路容量、功率因素均为线路本身信息,在串补装置加入前为定值,因此在具体实施过程中,要达到串补装置电压调节的最优结果,需综合考虑安装位置和补偿度。

若为山村、远方工厂供电的配电线路,其负荷均分布在线路末端,则电压调节效果则与串联电容器位置无关,串补装置的最佳安装位置为线路最末端紧靠首个负荷的电源侧,此时串联电容器承受的故

障应力最小,调压效果最佳。若配电线路全线均分布有负荷,为使得沿线电压均在合格范围,或者尽可能接近电压合格范围,则可以选择负荷最大时电压差为全线压降 1/2 左右的线路位置。当线路较长,使用一个串补装置不能达到预期的调压结果时,可以选择多处安装串补装置,并结合经济性评估,确定最优的串补方案。

配电网串补装置的补偿度多数选择接近 1 或者大于 1。当线路电压降落较小时,采用欠补偿可以满足电压提升要求时,应优先考虑采用欠补偿以降低投资成本。当欠补偿无法满足电压合格率要求时,可以采用过补偿,调节电压至目标电压。

4 实际应用

国网德阳供电公司所辖 10 kV 风孟线线路以 110 kV 风光变电站 10 kV 母线为电源点,线路主要信息如下:

1)线路性质为城网线路,但从 6 号杆开关为城农网分界点,线路后端为农网负荷。线路供电半径长,沿线均有较多的居民用电和工厂、高压用户负荷,线路后端用户反映电压跌落情况比较严重。

2)10 kV 风孟线线路信息和运行数据见表 1。

表 1 10 kV 风孟线线路和运行信息

线路参数	详细信息
线路总长/km	22.09
线路总容量/kVA	32 090
高压用户/户	35
公变台区/个	61
变电站母线电压/kV	10.5
末端线路电压/kV	8.7
线路始端电流(年度最大负荷)/A	254.3
线路始端功率因素	0.89
线路主干线型号	JKLYJ-240

根据潮流分析,线路在不安装串补装置的情况下,最大运行负荷时线路的沿线电压分布情况如图 7 所示。从图中可以看出该线路较长,且负荷较重,导致电压随线路增大而降低,线路末端更是从变电站 10 kV 母线侧的 10.5 kV 降到了 8.7 kV。同时,线路在 9 km 左右之前,电压下降比后端线路要快,

这是因为线路前端主要位于城市郊区,商业用电和工厂用电较多,而后端用户多位于城乡结合处的农村,多为居民用电,导致前端电压下降较快。

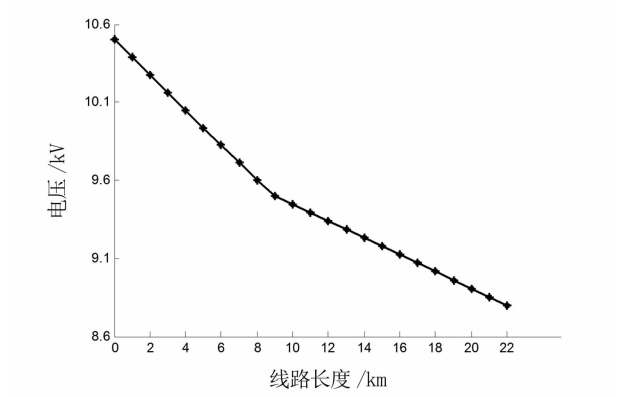


图 7 不装串补装置 10 kV 风孟线电压分布情况

按照前面的分析,该线路的串联补偿装置安装位置应在整条线路电压降的中间位置,即电压为 9.6 kV 处,串入电容器的补偿度为 1.25,此时,加入串补装置后,风孟线全线电压分布情况如图 8 所示。

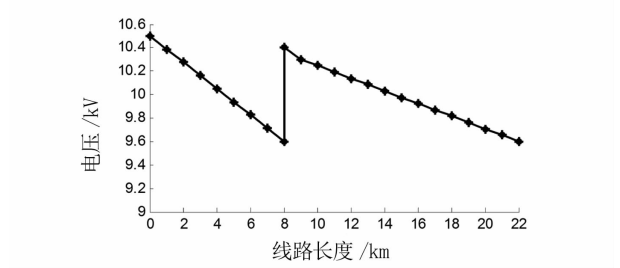


图 8 安装串补装置 10 kV 风孟线电压分布情况

从结果可以看出,在风孟线加入串补装置后,串补装置后的电压立即增大到 10.4 kV,并未造成过电压,经检测风孟线末端电压为 9.58 kV,处于合格范围内。

5 结 语

电能 在 输 送 过 程 中 由 于 线 路 存 在 阻 抗 和 感 抗,会有一定的压降,线路过长或负荷过重时,线路压降较大,末端电压较低,严重影响用户的用电。具有“自适应”功能的串补技术应用于配电线路,综合考虑线路阻抗、线路容量、功率因素等信息,确定串补安装位置和电容器容抗值,有效提高配电线路电压,达到调压目的。

参考文献

[1] 戴晓亮. 无功补偿技术在配电网中的应用[J]. 电网技术, 1999,23(6):1-7.

[2] 麦敏坚. 探讨改善配网的电压质量[J]. 广东科技, 2008(8):139-141.

[3] 杜修柯. 电网配电线路的最优无功补偿研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008,29(3):4-7.

[4] 张勇军,任霞,廖美英,等. 10 kV 长线路杆上无功优化补偿[J]. 中国电力, 2000,33(9):50-52.

[5] 樊丽霞,魏青艳. 无功补偿在配电网中的应用[J]. 山西电力, 2005(6):34-35.

[6] 王笑棠,王曜飞,宋亚夫,等. 串补解决 10 kV 配电线路高压与低压问题的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015,36(2):33-37.

[7] 梁一桥,吕佳铭,饶崇林,等. 一种 10 kV 配网智能串联补偿装置研制及其工程应用[J]. 电网技术, 2014,38(S2):220-225.

[8] 卓谷颖,江道灼,梁一桥,等. 改善配网电压质量的固定串补技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013,41(8):61-67.

[9] 赵文忠,王东平. 串联无功补偿技术在配电网中的应用分析[J]. 低压电器, 2010(5):37-44.

[10] 邓昆玲,郭厚静,程晓磊. 串联补偿对提高线路输电能力的影响分析[J]. 内蒙古电力技术, 2011(4):1-3.

[11] 雷宪章,POVH D. 串联补偿技术在距离高电压交流输电系统中的应用[J]. 电网技术, 1998,22(11):34-38.

[12] 宋怡群,曹荣江,顾霓鸿. 超高压和特高压串联电容补偿装置的通用原理设计[J]. 电网技术, 1989(2):32-35.

作者简介:

李 磊(1986), 工程师, 从事配电运维、配电自动化运行与管理相关工作;

唐 朝(1984), 工程师, 从事配电运检分析管理、配电自动化管理等工作;

范福强(1989), 工程师, 从事配电运维、配电自动化运行相关工作;

汪辰珏(1994), 助理工程师, 从事配电自动化运维工作;

全 翔(1985), 工程师, 从事配电网运维检修管理工作;

张 禹(1985), 工程师, 从事配电网运维检修管理工作;

李卓雯(1986), 硕士、工程师, 从事配电网运检计划管理工作;

曾 娜(1987), 工程师, 从事配电网生产技改大修项目管理工作。

(收稿日期:2018-07-06)

(上接第 4 页)

段发生故障的可信度,随后依据改进的决策原则确定最终故障区段,并提供备选方案,对误报和漏报的情况具有一定容错能力。最后的仿真分析也验证该方法的可行和有效,给基于故障指示器的故障定位方法研究提供了新的参考。

参考文献

[1] 费军,单渊达. 配网中自动故障定位系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000,20(9):32-34.

[2] 刘文轩,严风,田霖,等. 基于 LVQ 神经网络的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012,40(5):90-95.

[3] 郭壮志,陈波,刘灿萍,等. 基于遗传算法的配电网故障定位[J]. 电网技术, 2007,31(11):88-92.

[4] 陈歆技,丁同奎,张钊. 蚁群方法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006,30(5):74-77.

[5] 刘健,倪建立,杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 1999,23(1):31-33.

[6] 蒋秀洁,熊信银,吴耀武,等. 改进矩阵方法及其在配电网故障定位中的应用[J]. 电网技术, 2004,28(19):60-63.

[7] 彭正良. 基于改进 D-S 证据理论的配电网故障定位与分析[D]. 济南:山东大学, 2016.

[8] 汪永伟,刘育楠,杨英杰,等. D-S 证据理论中冲突处理新方法[J]. 计算机工程与设计, 2013,34(12):4316-4320.

[9] 高湛军,李思远,彭正良,等. 基于网络树状和改进 D-S 证据理论的配电网故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2018,38(6):65-71.

[10] 蒋黎明,何加浪,张宏. D-S 证据理论中一种新的冲突证据融合方法[J]. 计算机科学, 2011,38(4):236-238.

[11] 郑国华,黄朵,张伟,等. 基于最大概率的故障指示器故障判定方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017,45(16):105-110.

作者简介:

高艺文(1989), 工程师, 主要研究方向为配电网自动化、继电保护。

(收稿日期:2018-09-04)

一种新型 10 kV 配电网不停电作业工具改进与应用

叶东辉,陈 戈,全 翾,张 禹,唐 朝,吴志民,李卓雯,曾 娜
(国网德阳供电公司,四川 德阳 618000)

摘 要:在开展 10 kV 配电网不停电绝缘杆作业时,为保证作业安全,各类绝缘抱杆是必不可少的辅助工具。针对行业内传统绝缘抱杆普遍存在一定局限与缺点的现状,提出制作一种新型综合绝缘抱杆,从主体设计、稳固措施、安全性能、适用范围、安装流程等方面改进传统抱杆,进一步提高绝缘杆作业法开展安全性,拓宽绝缘杆作业法开展范围。
关键词:10 kV 配电网不停电作业;绝缘杆作业法;综合绝缘抱杆
中图分类号:TM727 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)06-0023-05

Improvement and Application of A New Operating Tool Using in Overhaul without Power Interruption in 10 kV Distribution Network

Ye Donghui, Chen Ge, Quan Xuan, Zhang Yu, Tang Chao, Wu Zhimin, Li Zhuowen, Zeng Na
(State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract:In the overhaul without power interruption in 10 kV distribution network using insulated stick method of operation, various kinds of insulated stick are the indispensable auxiliary tools to ensure the safety of operation. In view of the current situation that there are some limitations and disadvantages of the traditional insulated stick, a new type of integrated insulated stick is proposed. The integrated insulated stick has accomplished the improvement of main body design, stabilization measures, safety performance, applicable scope and installation process. Using integrated insulated stick, the operation will become safer and the insulated stick method of operation will be more and more widely used.
Key words:overhaul without power interruption in 10 kV distribution network; insulated stick method of operation; integrated insulated stick

0 引 言

随着中国经济与社会的高速发展,用电客户对供电可靠性的要求不断提高,大规模开展 10 kV 配电网不停电作业已成为供电公司实现客户“用好电、不停电”目标不可或缺的手段之一。配电网不停电作业主要采用绝缘杆作业法、绝缘手套作业法两种方式^[1]。

其中,绝缘杆作业法主要用于配电杆塔、设备所在道路狭窄,绝缘斗臂车等绝缘承载工具无法到位的作业现场。在实际作业中,当作业人员穿戴绝缘防护用具,攀登电杆采用绝缘杆作业法进行带电断引线、接引线、更换绝缘子等作业项目时,导线与绝缘子的连接位置所受剪切力较大^[2],存在导线断裂

及跌落、稳固绝缘子松动等潜在危险点,若发生将导致配电线路接地短路,对作业人员造成人身伤害,故在此类型作业中一般采用绝缘抱杆对导线进行支撑稳固;若不采取稳固措施,考虑到作业安全,此类作业往往无法开展。

下面就此作业关键点切入,通过对传统绝缘抱杆的分析改进,设计制作出了一种综合绝缘抱杆,保证绝缘杆作业法安全开展,拓展绝缘杆作业法适用范围。

1 绝缘杆作业法

为保证人员和设备的安全,带电作业需要满足以下几点要求:1)流经人体的电流不超过人体的感知水平 1 mA;2)人体体表局部场强不超过人体感知

水平 240 kV/m;3) 人体与带电体(或接地体)保持规定的安全距离。

根据上述基本安全要求,10 kV 配电网不停电作业发展出多种作业方式。按照所使用的绝缘工具进行划分,可分为绝缘杆作业法和绝缘手套作业法。其中绝缘杆作业法属于地电位作业,作业过程中作业人员保持人体与大地(或杆塔)同一电位,通过绝缘杆、绝缘抱杆、绝缘三齿耙等绝缘工具接触带电体进行检修操作。这时人体与带电体的关系是:大地(杆塔)人→绝缘工具→带电体。如图 1 所示。

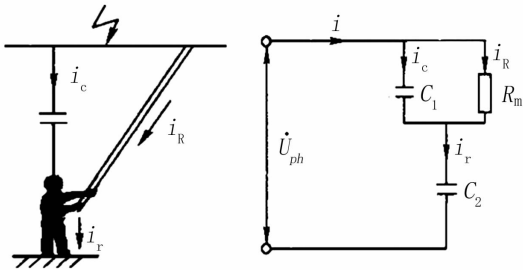


图 1 绝缘杆作业法示意及等值电路
(R_m 为绝缘工具电阻)

在开展绝缘杆作业法带电断引线、接引线、更换绝缘子等实际作业过程中,作业人员通过登杆工具(脚扣等)登杆至适当位置,系上安全带,保持与系统电压相适应的安全距离,作业人员应用端部装配有不同工具附件的绝缘杆进行作业。

此种作业方式的安全防护为:1) 以绝缘工具、绝缘手套、绝缘披肩、绝缘安全帽等组成带电体与大地之间的纵向绝缘防护,其中绝缘工具为主绝缘,绝缘手套、绝缘披肩、绝缘安全帽等起辅助绝缘作用,形成后备防护;2) 在相与相之间,空气间隙作为主绝缘,绝缘遮蔽罩、隔离板等起辅助绝缘作用,组成不同相之间的横向绝缘防护,避免因人体动作幅度过大造成相间短路;3) 配合使用羊角抱杆、多功能抱杆、横担抱杆等各类带电作业用绝缘抱杆,起到稳固导线、金具、绝缘子的作用,辅助作业人员更安全、更高效地开展作业。

2 传统绝缘抱杆缺点分析

如前面所述,配电网不停电作业过程中普遍使用的传统绝缘抱杆包括羊角抱杆、多功能抱

杆、横担抱杆等在安全性、绝缘性、适用性上都存在一定的不足。

2.1 传统羊角抱杆

顾名思义,此类抱杆顶端形似羊角,最大的缺点是只适用于单相导线相关工作,作业中仅能稳固中相导线,如图 2 所示。



图 2 传统羊角抱杆

2.2 传统多功能抱杆

可用于中相、三相导线作业等多种场景,但其主承力部件的孔洞较多,承力稳定性差,如图 3 所示。



图 3 传统多功能抱杆

2.3 传统横担抱杆

形似横担,一般安装在电杆横担下方适当位置,可支撑三角形排列的三相导线,但相间距离固定,对导线没有可靠的稳固措施,如图 4 所示。



图 4 传统横担抱杆

2.4 传统绝缘抱杆的不足

传统绝缘抱杆一般采用相互连接的竖杆和横杆组成,横杆上设置限制导线移动的凹槽或挂钩,竖杆上安装铁链或抱箍稳固在电杆上。此种结构存在 3 个方面缺点与隐患:

- 1)作业过程中,导线未与横杆上凹槽或挂钩固定,较容易从凹槽或挂钩中脱离,悬在空中不受控制或与支架上部分金属材料短接,对作业人员造成安全隐患;
- 2)在竖杆上,一般采用铁链或金属抱箍等稳固装置将绝缘抱杆固定在电杆上,此类稳固装置为非绝缘材料,同样存在安全隐患;
- 3)铁链等金属材料质量较重,抱杆安装过程繁琐,导致劳动强度大,安装抱杆的时间普遍就占用整个作业一般以上的时间,作业效率低下。

3 10 kV 综合绝缘抱杆的制作

针对传统绝缘抱杆不足之处,考虑设计一种安全性能高、适用范围广的综合性绝缘抱杆。

3.1 理论分析

1)第一要素是安全距离,抱杆的改进设计必须满足表 1 的要求^[3]。

表 1 10 kV 配网不停电作业安全距离规定

类别	数值
电压等级/kV	0
人体对带电体最小安全距离/m	0.4
最小相间安全距离/m	0.6
操作杆最短绝缘有效长度/m	0.7
承力杆、绝缘绳最短绝缘有效长度/m	0.4

由于绝缘抱杆在作业过程中主要作用为承力、稳固及辅助操作,其最短绝缘有效长度(接触带电体的各部位至接触人体部位的长度)应不得小于 0.7 m;另外,使用中需考虑导线相间距离,必须保证相间最小安全距离达到 0.6 m。

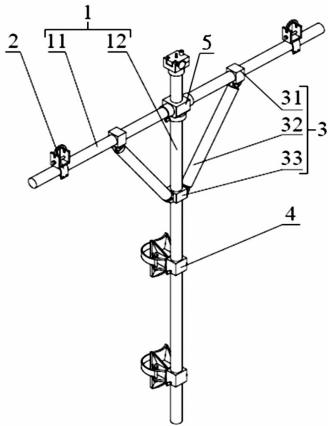
2)抱杆整体需采用全绝缘材料。目前中国带电作业使用的绝缘材料包括绝缘板材、绝缘管材、塑料薄膜、橡胶等,其中,绝缘管材这种层压制品由于具有良好的电气绝缘性能、机械性能及理化性能,因而广泛用于各类绝缘工具制作。综合考虑性能、经

济性、加工方便性等方面,选择环氧树脂绝缘管材进行加工制作。

3)考虑适用范围。由于绝缘杆作业法多用于 10 kV 配电网中的单回排列线路,单回线路又可分为三角形排列、水平排列等多种排列方式;根据不同安装工艺,不同线路上的导线与设备位置也不尽相同:故在抱杆设计时需考虑使用可移动、可调整、可拆分的零部件,以适应多种线路排列方式。

3.2 抱杆设计

考虑到综合羊角抱杆、多功能抱杆、横担抱杆等多种抱杆的使用功能,将抱杆形状设计如图 5 所示。



综合绝缘抱杆由 5 个部件构成^[4]:1-支架(11-支撑横杆、12-立杆);2-导线卡槽;3-斜撑杆(31-第 1 滑块,32-连接杆,33-第 2 滑块);4-稳固抱箍;5-稳固滑块。

图 5 综合绝缘抱杆设计

1) 支架、稳固滑块与斜撑杆

支架、稳固滑块与斜撑杆组成综合绝缘抱杆承力主体、绝缘主体。

支架由支撑横杆、立杆两部分构件构成,两根主体绝缘杆由环氧树脂管材加工制造,绝缘性能满足带电作业要求。

横杆与立杆通过可移动的稳固滑块、两根斜撑杆连接,稳固滑块如图 6 所示。

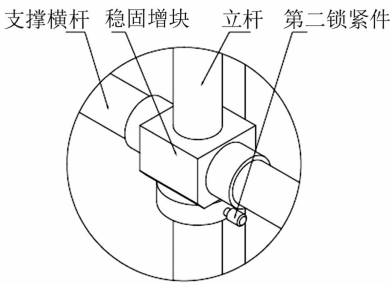


图 6 滑块细节

实际作业中,根据线路排列方式(三角形、水

平)移动稳固滑块,调整横杆与立杆顶部的垂直距离满足中相导线与两边相导线的垂直距离后,旋紧第二锁紧件固定住滑块。

斜撑杆配合稳固滑块进行调整支撑,主要辅助承受边相导线自重。支架整体安装在电杆后,可承受导线部分重量,减少导线与绝缘子连接部位所受剪切力。

2) 导线卡槽

如图 7 所示,导线卡槽由限位凹槽、锁扣件、第一锁紧件、限位块构成,用于固定两边相导线。作业过程中,通过第一锁紧件将导线卡槽固定在横杆两端,用绝缘操作杆打开锁扣件,方便导线进入限位凹槽并受到限位块限制,避免出现导线脱落不受控制的情况。

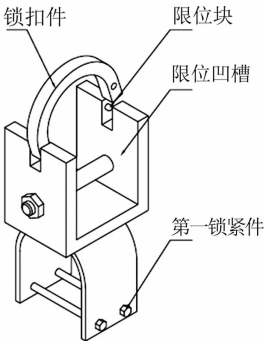


图 7 导线卡槽细节

3) 稳固抱箍

如图 8 所示,此综合绝缘抱杆装置需两个稳固抱箍,分别由连接块、锁紧带构成,用于将抱杆固定在电杆上。连接块由金属铸造,机械强度足够;锁紧带由布质材料制成,布带式锁紧带较原有金属链条抱箍相比,既保证机械强度同时又具有良好的绝缘效果,也减轻了配件重量,方便安装。

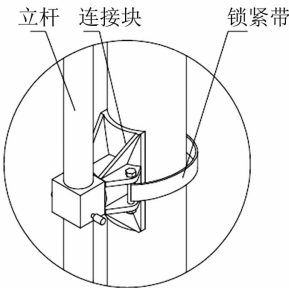


图 8 稳固抱箍细节

3.3 制作与试验

按照设计图,加工制作出 10 kV 综合绝缘抱杆,如图 9 所示。

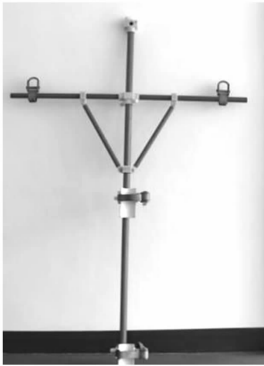


图 9 综合绝缘抱杆实物

根据电气试验要求对绝缘抱杆进行工频耐压试验,如图 10 所示。试验电压为 45 kV,持续 1 min^[5-6]试验过程中,绝缘抱杆无火花、飞弧或击穿现象,装置无明显发热。试验表明,综合绝缘抱杆绝缘性能满足带电作业要求。

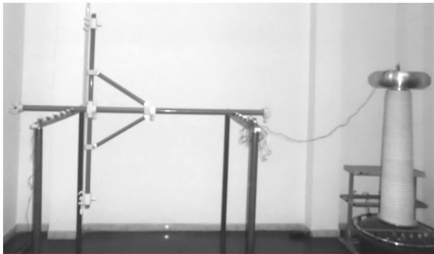


图 10 工频耐压试验

4 应用推广与成效

4.1 试点使用

通过工频耐压试验后,将综合绝缘抱杆分别应用于广汉 10 kV 三凉路新丰支线 82 号杆、什邡 10 kV 双禾路松柏支线 26 号杆、中江 10 kV 回朝路 06 号杆等 3 处进行绝缘杆作业法带电接引线的作业,如图 11、图 12 所示。



图 11 地面练习安装

作业过程表明,综合绝缘抱杆安装方便灵活,

安装时人体与带电体的安全距离较大,不会碰触带电体;安装后可实现对三相导线的可靠固定,减小了使用绝缘杆接引线时绝缘子所受剪切力,保证了接引线过程稳定安全实施。



图 12 实际作业现场

4.2 推广成效

试点使用成功后,将综合绝缘抱杆推广用于各类绝缘杆作业。由于此综合绝缘抱杆可大幅度提高绝缘杆带电作业的安全性,可通过杆体调整适用于多种线路排列方式,此前许多不满足条件的作业现场都可开展绝缘杆作业。

统计推广使用后的 2017 年,国网德阳供电公司利用综合绝缘抱杆辅助开展绝缘杆作业法带电断引线 67 次,带电接引线 128 次,减少停电时户数 为 19 265 时·户,多供电量 2.5976×10^6 kWh,直接经济效益 120 余万元。

10 kV 配电网不停电作业综合绝缘抱杆也获得了行业内的高度认可,于 2017 年 7 月获实用新型专利(专利号 ZL 201720051536.5),12 月获国网四川省电力公司工人技术创新一等奖。

5 结 语

此次研制出的 10 kV 配电网不停电作业综合绝缘抱杆,较传统带电作业用绝缘抱杆相比,有了多方面的功能提升,整套工具更安全、更适用、更方便,体现在以下 6 个方面:

1)整体绝缘性能优良,通过工频耐压试验,满足配电网不停电作业要求;

- 2)整体机械性能良好,能承载三相导线重量;
- 3)横杆导线稳固装置采用锁扣式,稳固支撑导线更可靠;
- 4)竖杆稳固抱箍采用布带式,绝缘性能好、重量轻、安装快;
- 5)适用范围广,支撑横杆与导线稳固装置可任意调整位置,可适用单回三角、水平排列的 10 kV 配电线路;
- 6)抱杆安装灵活方便,减少作业劳动强度。

参考文献

[1] 10 kV 配网不停电作业规范:Q/GDW 10520 - 2016 [S],2016.

[2] 赵志修,费晓明,吴泗顺,等. 绝缘杆作业法带电搭接引流线新工具的研制与应用[J]. 浙江电力,2016,35 (7):28 - 31.

[3] 国家电网公司人力资源部. 带电作业基础知识[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

[4] 国网四川省电力公司德阳供电公司. 架空配电线路带电作业用支架 201720051536.5[P]. 2017 - 07 - 18.

[5] 电作业工具、装置和设备预防性试验规程:DL 976 - 2005[S],2012.

[6] 韩东红. 配电带电作业新工具的研发和应用[C]. 供电企业带电作业技术研讨会,2012.

作者简介:

- 叶东辉(1993),助理工程师,从事配电网不停电作业各类工作;
- 陈 戈(1975),技师,从事配电网不停电作业管理、作业现场监督等相关工作;
- 全 翔(1985),工程师,从事配电网运维检修管理工作;
- 张 禹(1985),工程师,从事配电网运维检修管理工作;
- 唐 朝(1984),工程师,从事配电运检分析管理、配电自动化管理等工作;
- 吴志民(1988),助理工程师,从事配电网不停电作业各类工作;
- 李卓雯(1986),硕士、工程师,从事配电网运检计划管理工作;
- 曾 娜(1987),工程师,从事配电网生产技改大修项目管理 工作。

(收稿日期:2018 - 06 - 06)

低温环境下 XLPE 材料中水树生长特性的研究

冯 杰¹,濮峻嵩¹,刘 曦¹,周 凯²,李康乐²,张春硕²
(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;
2. 四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘 要:为了研究低温条件下水树的生长特性,研究了 XLPE 薄片样本在 0 ℃ 下不同老化时期的水树生长速率变化。在 XLPE 薄片样本中制造针孔缺陷,之后将样本分为 3 组,并对其在 0 ℃ 下分别进行为期 14 d、21 d、28 d 的加速水树老化。利用光学显微镜观测样本中的水树微观形貌和水树长度,并结合电场仿真分析水树在低温下生长速率变化原因。实验结果表明,在低温条件下,样本中的水树明显呈枝状。此外,水树生长速率随着老化时间的增加逐渐增加。电场仿真结果表明,水树长度越长,水树尖端的电场越强。根据水树生长的电机械老化理论,电场越大,水树尖端处的 XLPE 分子链受到的麦克斯韦应力越大,分子链越容易发生疲劳断裂,导致水树生长速率越大。
关键词:XLPE;电缆;水树;低温;生长速率;电场;麦克斯韦应力
中图分类号:TM247 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2018)06 - 0028 - 04

Research on Characteristics of Water Tree Growth in XLPE under Low Temperature Environment

Feng Jie¹,Pu Junsong¹,Liu Xi¹,Zhou Kai²,Li Kangle²,Zhang Chunshuo²
(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract:In order to investigate the characteristics of water tree growth under low temperature, the propagation rates of water trees in XLPE sheet samples are researched in different aging periods. Pinhole defects are made in XLPE sheet samples, then the samples are divided into three groups, and they are subjected to an accelerated water tree aging for 14, 21 and 28 days, respectively. The morphology of water trees is observed by an optical microscope, and the length of water trees are measured. Combining with the electric field simulation, the reasons for the changes of the propagation rates of water trees under low temperature are analyzed. The results show that the growth rate of water trees increases with time under low temperature. The experimental results show that under low temperature, the water trees are in dendritic shape. In addition, with the increase in aging time, the propagation rate of water trees increases. The electric field simulation shows that the electric field strength at the water tree tips becomes greater with the increase in water tree length. According to the electrical mechanical damage theory of water trees, the stronger the field strength, the greater the Maxwell forces at the water tree tips, and the molecular chains of XLPE can fracture easier under the effect of the Maxwell forces. As a result, the propagation rate of water trees can become larger.
Key words:XLPE; cable; water tree; low temperature; propagation rate; electric field; Maxwell forces

0 引 言

中国在城市化建设过程中,在城市配电网中敷设了大量交联聚乙烯(XLPE)电缆。然而由于早期
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477106)

敷设的电缆制造工艺落后,并且由于敷设过程中存在不规范操作等,在电缆绝缘层中不可避免地存在一些微观的缺陷,如微孔、裂缝等。当环境中的水分侵入电缆绝缘层后,在绝缘中的微观缺陷处将形成应力集中区,在电压长期作用下容易在缺陷部位引发水树^[1-6],甚至电树(过电压作用),并导致电缆

发生击穿事故^[7-8]。由于中国幅员辽阔,东北、西北等局部地区的冬季平均气温接近甚至低于0℃。此外,由于负荷波动等原因,电缆绝缘将受到低温的作用,在低温条件下的水树生长特征值得研究。

不同温度下水树的生长特性是国内外研究者关注的重点。然而对于在不同的温度下XLPE电缆中水树生长的规律,目前的研究尚未得到统一的结论。有研究认为在高温下水树生长速率提高,但同时也有研究认为随着温度升高,水树生长速率将下降。另有研究表明低温下水树生长速率将增加^[9-11]。以往的研究大多集中在研究不同温度下水树形态、生长速率等方面,尚未关注在一个较长的老化时期内低温下的水树生长特征,例如水树生长速率随着老化时间的变化及其原因分析。有关此方面的研究有助于进一步探索水树在低温下的生长规律,此外对于提高局部寒冷地区XLPE电缆的绝缘状态监测及运维管理水平亦有现实的指导价值。

在低温(0℃)条件下将3组XLPE样本分别进行为期14 d、21 d、28 d(d为天数)的加速水树老化,观测了老化XLPE样本中水树的微观形貌和水树长度,并通过电场仿真分析低温下水树生长速率变化的原因。

1 样本制作及加速老化实验

在3 mm厚的XLPE薄片上截取6片边长50 mm、厚度3 mm的正方形XLPE薄片,将6片样本分为A、B、C三组。其中样本1、2属于A组,样本3、4属于B组,样本5、6属于C组。之后选取3组样本正中间的圆形区域(直径25 mm)作为水树老化区,采用注射器针头在此区域制作3行平行的针孔缺陷(针孔深度1.5 mm)。注射器针头的参数如下:

1)斜面长度3 mm;2)针尖倒角(17±2)°;3)针尖曲率半径(2.5±0.5) μm。XLPE水树老化样本如图1所示。

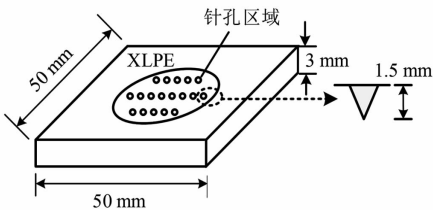


图1 XLPE薄片样本

将A、B、C 3组薄片样本放置于 IEC/TS 61956 推荐的杯状试验装置,杯状实验装置中装有质量分数为20%的氯化钠溶液。将杯状实验装置放置于恒温箱中,将恒温箱的温度设置为0℃。将杯状实验装置下电极接地,上电极施加高频高压(有效值7.5 kV,频率400 Hz),在0℃恒温条件下进行加速水树老化^[11-12],如图2所示。A、B、C 3组薄片样本的老化时间分别为14 d、21 d、28 d。

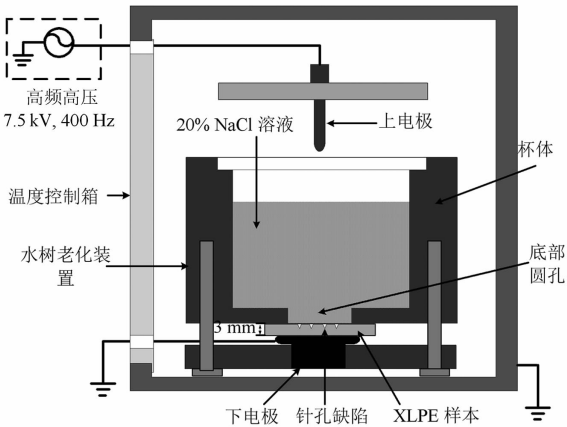


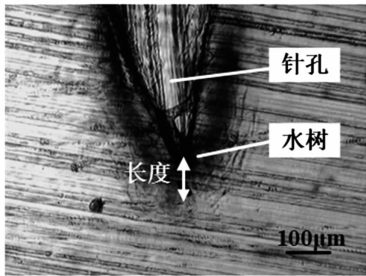
图2 加速水树老化实验装置

2 实验结果

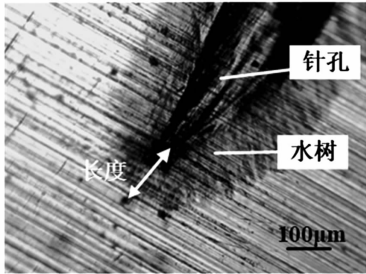
为了观测XLPE薄片样本中水树的生长情况,加速水树老化结束后,将A、B、C 3组样本切片进行水树观测。在垂直于样本表面方向上,利用切片机沿针孔边缘切出厚度为100±10 μm的切片。之后利用亚甲基蓝溶液在90℃时将切片染色,通过光学显微镜观察水树形态(显微镜放大倍数为64倍和160倍)。低温下不同老化时间的水树形态如图3所示。

由图3可以看到,在低温环境下,水树从缺陷处引发,沿电场方向向前生长。老化14 d时水树形态呈片状,即水树枝相互连接,水树的枝状特征并不明显。而老化21 d后,水树的分枝状特征已经较为明显,在针孔周围均存在枝状的水树枝。而老化28 d后,水树的分枝状特征更为明显,且越靠近水树尖端,水树枝越尖。另外,随着老化时间增长,水树染色逐渐加深。由图3(c)可见,老化28 d以后,针孔尖端的水树染色明显加深。

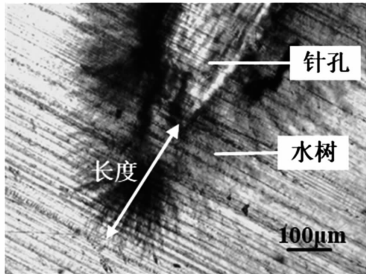
为了进一步研究低温下水树的生长速率变化,统计3组样本中的水树平均长度。测量水树长度时是以针尖为起点,以针尖正前方最长水树枝末端为终点。水树长度统计结果如图4所示。



(a)A 组样本 (老化 14d)



(a)B 组样本 (老化 21d)



(a)C 组样本 (老化 28d)

图 3 3 组样本中的水树形态

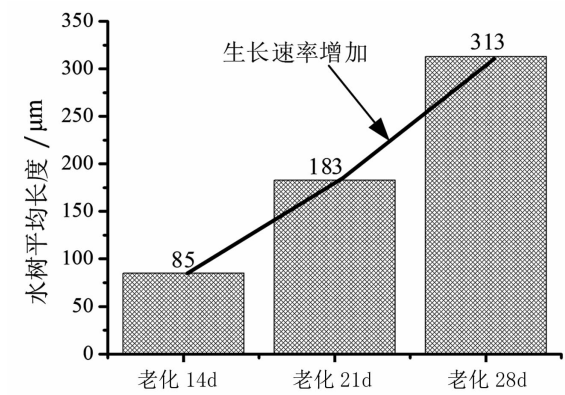


图 4 3 组样本中的平均水树长度

由图 4 可以看到,老化 14 d 后水树的平均长度为 85 μm,21 d 后水树平均长度为 183 μm,28 d 后水树平均长度为 313 μm。老化时间越长,水树生长速率增大: 老化 0 ~ 14 d,水树平均生长速率为 6 μm/d;15 ~ 21 d,水树的平均生长速率为 14 μm/d;22 ~ 28 d,水树的平均生长速率为 18 μm/d。22 ~ 28 d,水树增加的长度是 15 ~ 21 d 增加的水树长度的 1.3 倍。

3 讨 论

水树枝的产生和发展是电场和水分共同作用的结果,绝缘层中的缺陷和半导体层的凸起会成为局部电场应力集中点,在外加交流电场作用下,XLPE 分子链将受到周期性麦克斯韦应力作用并发生疲劳断裂,进而形成水树枝^[13]。麦克斯韦应力公式为^[14]

$$F = (\epsilon_0/2)\nabla(\epsilon_r - 1)E^2 \tag{1}$$

式中:ε₀为真空的介电常数;ε_r为电介质的相对介电常数;E 为电场强度。式(1)表明,电场越强,XLPE 分子链受到的麦克斯韦应力越大,越容易发生疲劳断裂,导致水分扩散速率及水树生长速率越大。值得注意的是,由于在水树生长过程中,水树生长速率主要是由水树尖端电场强度所决定的,因此有必要研究低温下不同水树长度时水树尖端的电场强度。

为此,根据图 3 水树枝观测结果,利用多物理场有限元仿真软件建立如图 5 所示的 XLPE 薄片水树仿真模型。依据 0 ℃ 不同老化时间下的水树长度,设置水树长度(沿针孔方向从针孔缺陷尖端到水树尖端的距离)分别为 100 μm、200 μm、300 μm,计算沿着针孔方向 AB 水树尖端的电场强度,如图 5 所示。仿真分析中,薄片及水树区域的电场参数如表 1 所示^[1-5]。电场仿真结果如图 6 所示。

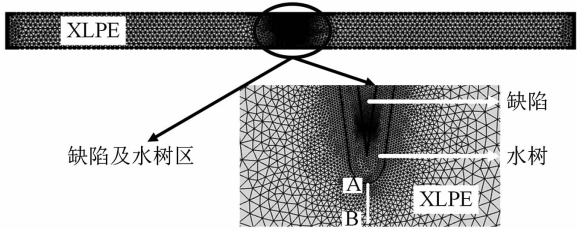


图 5 水树仿真模型

表 1 水树模型电场参数设置

部位	电导率 γ/(S · m ⁻¹)	相对介电常数 ε _r
充水针孔	2	81
水树区域	1 × 10 ⁻¹¹ ~ 1 × 10 ⁻⁷	2.7 ~ 16
XLPE 绝缘层	1 × 10 ⁻¹⁷	2.3
半导体层	2 × 10 ⁻³	100
缆芯(铝)	3.82 × 10 ⁷	—

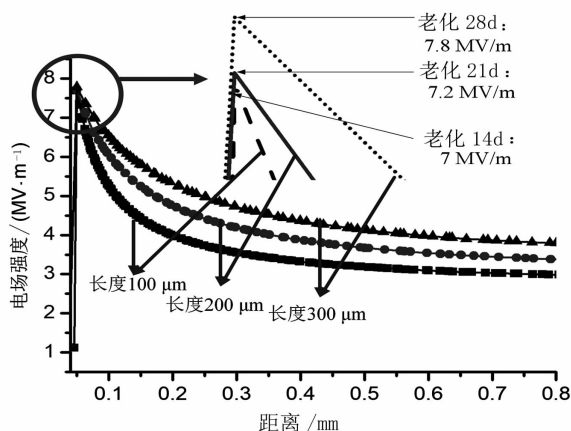


图 6 不同老化时期水树尖端电场仿真结果

由图 6 可知,在水树尖端存在严重的电场畸变。水树老化 14 d 时,水树尖端电场为 7 MV/m;老化 21 d 时,水树尖端电场为 7.2 MV/m;老化 28 d 时,水树尖端电场为 7.8 MV/m。由此可见,当水树长度增加时,水树尖端电场逐渐增强。事实上,在低温下进行水树老化时,由于此时 XLPE 材料的弹性模量较高,相对于高温,材料受同样的应力作用时形变量较小,水树空洞在电场作用下更容易被“拉长”,导致水树枝尖端电场强度增强。同时由于 XLPE 材料本身结构的不均匀性,在材料局部存在一些更大的缺陷(例如微裂纹等),在这些地方水树枝更容易沿着电场方向向前生长,从而造成在这些区域的水树生长速率高于临近区域,进而导致水树逐渐出现分枝状特征,并且随着老化时间增长这种分枝状特征更为明显,水树尖端电场亦随之增强(如图 3 所示)。

由此可知,随着老化时间的增长,水树尖端电场增强,XLPE 分子链受到的麦克斯韦应力越大,分子链更容易发生疲劳断裂,进而导致水树生长速率升高。仿真结果与实验所得结果一致,图 4 与图 6 结果均表明:老化时间越长,水树枝生长速率越快。因此,当水树桥接绝缘的大部分时,应该引起足够的重视,进一步采取措施,否则在过电压(操作或雷电过电压)作用下,水树尖端容易引发电树,导致发生电缆击穿事故。

4 结 语

在 0℃ 下进行水树老化实验,通过光学显微镜观察了水树形态,统计了各个老化阶段的水树长度,并通过电场仿真分析了低温环境下水树的生长速率提升的现象。得出以下结论:

1)在低温条件下,随着老化时间的增长,水树的生长速率逐渐增加。

2)在低温下进行水树老化时,随着老化时间的增长,水树尖端电场逐渐增强,导致水树生长速率逐渐增加。

3)水树在低温下的生长速率变化与 XLPE 材料在低温下的力学特性密切相关。在低温下材料的弹性模量更高,水树空洞被拉长,从而形成分枝状特征并导致水树尖端电场增强。

参考文献

- [1] Crine J P, Jow J. A Water Treeing Mode[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(4): 801–808.
- [2] 王金锋,刘志民,李彦雄,等. 化学交联方式对聚乙烯水树枝老化特性的影响[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2477–2484.
- [3] 周凯,赵威,陶文彪,等. XLPE 电缆绝缘水树老化的无机修复机理及试验分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 67–73.
- [4] 周凯,陶霁韬,杨滴,等. XLPE 电缆水树老化过程中半导体层缺陷的形成机理[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 124–130.
- [5] 周凯,李康乐,杨明亮,等. 由异常水树形态洞察力学取向对水树生长的影响[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5373–5381.
- [6] 李康乐,周凯,黄明,等. XLPE 在电场作用下的取向对温度变化条件下水树生长的促进作用机理[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 956–964.
- [7] Chen X, Xu Y, Cao X, et al. Effect of Tree Channel Conductivity on Electrical Tree Shape and Breakdown in XLPE Cable Insulation Samples[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3): 847–860.
- [8] 郑晓泉,王金锋,李彦雄. 交联聚乙烯中水树枝向电树枝的转化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 36(22): 166–174.
- [9] 高小庆,罗俊华. XLPE 电力电缆过负荷温升与早期损坏机理的研究[J]. 高电压技术, 1997, 23(2): 62–64.
- [10] Al-Arainy A A, Ahaideb A A, Qureshi M I, et al. Statistical Evaluation of Water Tree Lengths in XLPE Cables at Different Temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6): 995–1006.

(下转第 46 页)

输电线路超短期覆冰厚度精准预测模型研究

莫思特, 刘天琪, 曾 琦

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:冬季架空输电线路覆冰是导致输电线路发生冰雪灾害的直接原因,在线实时融冰是预防冰雪灾害的有效措施。对于冻雨致冰厚度的精准预测,是实施最优融冰方案的前提。设计了模拟导线监测系统和现场微气象系统,以模拟导线监测数据和微气象站技术,结合冻雨覆冰理论计算空气中前期液态水含量。基于灰色系统理论,应用GM(1,1)模型,预测空气中超短期液态水含量、风速、降雨量。在此基础上,根据所预测液态水含量、风速、降雨量计算覆冰增长速度。综合多种实际监测数据,建立覆冰数据仿真模型。

关键词:实时融冰;输电线路;精准预测模型;冻雨致冰;灰色系统理论

中图分类号:TM726 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)06-0032-05

Research on Accurate Prediction Model for Icing Thickness of Transmission Lines in Ultra – short Period

Mo Site, Liu Tianqi, Zeng Qi

(College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: The icing on transmission lines is the key issue to cause snow and ice disasters during the winter. The on – line real – time ice – melting technology is an effective measure to relieve the snow and ice disasters. The accurate prediction of icing thickness on transmission lines due to freezing rain is the precondition of deciding the optimal ice – melting scheme. The simulated wire monitoring system and the on – site micrometeorology system are designed to simulate the conductor monitoring data and microweather station, and calculate the water content in the air according to the icing theory due to freezing rain. Based on grey system theory, GM(1,1) model is applied to predict the water content, wind speed and rainfall in the air. The icing growth rate is figured out based on the predicted liquid water content, wind speed and rainfall. The simulation model of icing data is established by combining various actual monitoring data.

Key words: real – time ice – melting; transmission line; accurate prediction model; ice due to freezing rain; grey system theory

0 引 言

当气温处于-10℃~0℃时,如果下雨或空气中含大量液态水滴,液态水滴将可能与架空高压输电线路碰撞致冰,附着在输电导线上形成输电线路覆冰。若输电电路覆冰不能及时去除,将导致输电塔线承重超出设计载荷而损坏。历史上,有许多输电线路冰雪灾害的典型案列,北美、北欧、俄罗斯、英国、日本等国家和地区都有大量报道^[1-2]。中国近年来大面积冰暴灾害事故时有发生,并导致电网发

生倒塔、断线、舞动、覆冰闪络等多种灾害^[3-4],由此造成的损失难以估量。输电线路融冰技术研究吸引了大量业内研究者^[5-6],断电离线融冰取得了丰硕成果,但是由于需要断电操作,故需谨慎决策,难以真正消除冰雪天气导致的输电线路冰暴灾害。

在线实时融冰技术,将可以有效防止输电线路覆冰灾害,减少输电线路覆冰承载参数,降低输电线路设计成本。文献[7]提出一种自融冰导线设计方法,并设计了自融冰设备,为实现输电线路实时在线融冰提供了新思路和新方法。

输电线路覆冰超短期精准预测技术是实施高效优化的在线实时融冰的前提和基础。业内学者采用

基金项目:国家重点研发计划“500 kV 直流断路器在直流系统的应用特性与自分断技术”(2017YFB0902401)

相关系数与置信度、支持向量机(support vector machine, SVM)、神经网络、模糊隶属度、重现期计算方法等技术,对长期、中期、短期输电线路融冰技术开展了广泛研究^[8-10],但尚未检索到对未来 10 min 左右的超短期输电线路覆冰状态的精准预测方法。造成输电线路冰灾受损的最主要因素是冻雨积冰,2008 年南方出现历史上罕见的冰暴灾害,造成输电线路的巨大损失,也是因为长期连续的冻雨所致^[11-13]。因此,研究超短期冻雨致冰精准预测方法,为在线实时融冰提供可靠数据,对于防止输电线路覆冰灾害具有重要意义。

1 精准预测基本原理

通过现场模拟导线数据采集系统,可以采集近期输电线路覆冰数据;应用冻雨覆冰计算方法,可以计算空气中的液态水含量;根据测量及计算数据,应用灰色系统的 GM(1,1)模型,预测几分钟内液态水含量的发展趋势,并根据液态水含量计算覆冰增长趋势,为输电线路在线实时融冰提供依据。

1.1 冻雨积冰数学模型

业内有多种冻雨积冰数学模型,其中认可度最高的是 Jones 模型^[14],诸多学者都对 Jones 模型进行了实验验证^[15-16]。这里也基于 Jones 提出的冻雨积冰数学模型来进行研究,如式(1)所示。

$$R_{eq} = \frac{1}{\rho_i \pi} \sum_{j=1}^n \sqrt{\left(\frac{1}{60} P_j \rho_w\right)^2 + (0.06 V_j W_j)^2} \quad (1)$$

式中: R_{eq} 为导线覆冰等效厚度; n 为冻雨持续时间,min; P_j 是对应时刻的降雨强度,mm/h; W_j 为对应时刻液态水含量,g/m; ρ_i 为冰密度; ρ_w 为水密度; V_j 为风速。 ρ_i 和 ρ_w 为已知的, P_j 、 W_j 和 V_j 则需要在线测量。液态水含量 W_j 不便于直接量测,可通过拉力传感器测量积冰重量,利用式(1)来计算。

1.2 模拟导线数据采集系统

模拟导线数据采集系统包括微气象数据采集模块和在线模拟导线数据采集模块。考虑工程应用经济性和实际需求,微气象数据采集模块测量参数包括空气温度、空气湿度、降雨量、大气压、风速、风向,设计框图如图 1 所示。

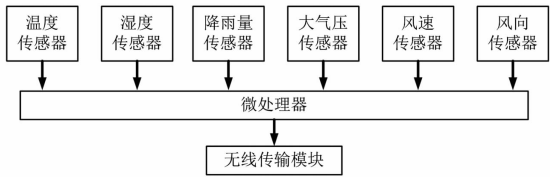


图 1 微气象数据采集模块结构

在线模拟导线数据采集模块如图 2 所示。图 2 中,模拟导线是输电导线上截取的一小段,在输电导线相同环境下,可以精确模拟输电导线的覆冰过程。模拟导线的整体重量为模拟导线重量和覆冰重量之和,通过拉力传感器采集连接杆的受力,将受力减去模拟导线和连接杆的重量,可以算出输电导线覆冰重量。

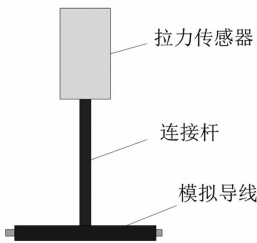


图 2 在线模拟数据采集模块

1.3 灰色预测理论

1981 年,邓聚龙教授首次提出了“灰色系统”这一概念。1982 年,邓聚龙教授发表的论文“The Control Problems of Grey Systems”和《灰色控制系统》,标志着灰色系统理论的诞生。灰色系统理论通过从已知信息中产生、开发和挖掘有用信息,探索研究对象的客观规律^[17-22]。

灰色预测模型是灰色系统理论最重要的内容之一,在社会学领域、自然科学领域、工程领域等方面,灰色预测模型都有许多应用案例。用于数据预测的灰色预测模型主要有:GM(1,1)模型、GM(2,1)模型、GM(0,N)模型、GM(1,N)模型、M GM(1,N)模型、GM(1,1)幂模型等等。其中,GM(1,1)模型只需要一个参数且只计算一阶微分方程,因参数少、计算简单得到广泛应用。这里选择 GM(1,1)模型进行预测。

灰色系统理论的基本思想是:客观系统是有整体功能的,无论其现象多么复杂,数据多么乱,必然蕴涵某种内在规律。可见,灰色系统理论是一种从数据中挖掘数据规律的理论体系。式(1)揭示了输电线路的覆冰规律,通过对式(1)未知参数的预测,可以预测未来输电线路覆冰增长规律。

通过前 30 min 的测量数据,应用灰色预测模型预测后十多分钟的覆冰增长状态,符合灰色系统理论的基本思想,因此用灰色预测模型预测未来十多分钟内的导线覆冰增长规律具有可行性。由于未来十多分钟的气候与前 30 min 内的气候有类似的客观规律,利用灰色预测模型进行超短期预测,不会有太大误差。

2 精准预测方法

通过微气象站数据采集模块和在线模拟数据采集模块,每 3 min 采集 1 组数据,总共采集 10 组数据,根据所采集的 10 组数据建立 GM(1,1)模型。根据 GM(1,1)模型预测未来 12 min 内的风速、降雨量、液态水含量,通过所预测的风速、降雨量、液态水含量预测未来 9 min 内的覆冰增长状态。具体方法如下。

2.1 输入数据

在式(1)中,需要预测的量有降雨强度 P_j 、液态水含量 W_j 和风速 V_j 。其中降雨强度和风速可以通过微气象站前 30 min 采集的数据预测,液态水含量可以通过图 2 的测量方法,应用式(1)计算。

每隔 3 min 采集一次降雨强度、风速、覆冰重量,按时间先后顺序,分别记为 $P = (p(1), p(2), p(3), \dots, p(10))$; $W = (w(1), w(2), w(3), \dots, w(10))$; $G = (g(1), g(2), g(3), \dots, g(10))$ 。对应的等效覆冰厚度分别为 $R = (r(1), r(2), r(3), \dots, r(10))$, 根据式(1), 有

$$r(i+1) = r(i) + \frac{3}{\rho_i \pi} \sqrt{\left(\frac{1}{60} P_{i+1} \rho_w\right)^2 + (0.06 V_{i+1} W_{i+1})^2} \quad (2)$$

$$\text{令 } \Delta = \frac{3}{\rho_i \pi} \sqrt{\left(\frac{1}{60} P_{i+1} \rho_w\right)^2 + (0.06 V_{i+1} W_{i+1})^2}, \text{ 有}$$

$r(i+1) = r(i) + \Delta$, Δ 表示覆冰厚度增长。

设模拟导线长度为单位长度 1 m, 导线的半径为 R_d , 则,

$$g(i+1) = \pi (R_d + r(i) + \Delta)^2 \rho_i + g_0 \quad (3)$$

$$g(i) = \pi (R_d + r(i))^2 \rho_i + g_0 \quad (4)$$

式(3)与式(4)中, g_0 为模拟导线重量减去与模拟导线等体积的冰的重量。式(3)减去式(4), 忽略 Δ^2 项, 得到:

$$g(i+1) - g(i) = \rho_i \pi (2(R_d + r(i)) \Delta \quad (5)$$

根据式(5), 可以得到:

$$w(i+1) = \frac{1}{0.06v(i+1)} \sqrt{\left(\frac{g(i+1) - g_0}{6(R_d + r(i))}\right)^2 - \left(\frac{p(i+1)\rho_w}{60}\right)^2} \quad (6)$$

根据式(4), 可以算出:

$$r(i) = \sqrt{\frac{g(i) - g_0}{\pi \rho_i}} - R_d \quad (7)$$

由此, 根据上述参数可以预测 3 min、6 min、9 min、12 min 的降雨强度、液态水含量和风速。

2.2 灰色系统预测方法

2.2.1 极比检查

$$\sigma(k) = \frac{x(k-1)}{x(k)} \quad (8)$$

根据式(8)构建极比序列: $\sigma = (\sigma(2), \sigma(3), \sigma(4), \dots, \sigma(n))$, 根据序列数目确定可容覆盖范围, 并判断极比序列数据范围。当极比序列都落在可容覆盖范围时, 可以进行 GM(1, 1)建模。

2.2.2 GM(1,1)建模

GM(1, 1)建模计算过程如下:

1) 序列初始数据为第 2.1 节测量的降雨强度、风速或液态水含量。

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)) = X \quad (9)$$

2) 根据式(10)计算累加序列 $X^{(1)}$ 。

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), (k=1, 2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

$$X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$$

3) 根据式(11)计算紧邻均值序列 $Z^{(1)}$ 。

$$z^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)}{2} \quad (11)$$

$$Z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), z^{(1)}(4), \dots, z^{(1)}(n))$$

4) 根据式(12)至式(14)计算发展系数 a 和灰色作用系数 b 。

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & 1 \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Y_n = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \dots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y}_n \tag{14}$$

2.2.3 预测

令 $x^{(1)}(0) = x^{(0)}(1)$, 根据式 (15)、式 (16) 进行模型值计算。

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[x^{(1)}(0) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \tag{15}$$

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \tag{16}$$

当 $k \leq 10$ 时, 计算值为模型值, 用于检验模型是否正确。当检验模型正确时, 取 $k > 10$, 就可对未来进行预测。

2.2.4 预测检验

根据对实际值的计算结果进行预测检验。预测检验采用残差检验方法:

$$\text{残差} = (\text{实际值} - \text{模型值}) / \text{实际值} \tag{17}$$

当所有残差绝对值小于 0.2 时, 可以判断预测结果正确。

2.3 覆冰计算方法

将第 2.1 节的数据序列用于第 2.2 节的预测方法, 可以预测未来 3 min、6 min、9 min 的降雨强度、液态含量和风速, 然后根据式 (1) 计算覆冰厚度。

3 仿真验证

综合已发表论文中的测量数据, 建立风速、降雨量、液态水含量的仿真数据模型, 根据液态水含量计算覆冰状态仿真数据模型。总共仿真 42 min 的数据模型, 根据前 30 min 的数据预测后 12 min 的结果, 并将预测结果跟仿真模型的后 12 min 数据对比, 验证仿真模型的正确性。

3.1 仿真数据模型

文献 [14] 对输电线路覆冰做了长时间的现场实验, 取得了大量的数据。由于其数据没有针对超短期预测, 因此, 可以根据其数据结果来设计超短期仿真数据模型。

仿真数据模型通过 3 次多项式来模拟, 仿真模拟多项式为

$$S(i) = A \left(1 + \frac{Bk_i + Ck_i^2 + Dk_i^3}{B + D} \right) \tag{18}$$

式中: $B、C、D$ 为最大值为 1 的随机函数的绝对值; $k_i = (i/10), i = 1, 2, 3, \dots, 14; A$ 按式 (19) 取值。

$$A = \text{Min} + |\text{rand}| (\text{Max} - \text{Min}) \tag{19}$$

式中: rand 为幅值为 1 的随机函数; Min、Max 的取值根据文献 [16] 实际测量数据来决定, 根据文献 [16] 中图 5.1、图 5.4、图 5.5 的测量结果, Max 和 Min 的取值如表 1 所示。

表 1 Max 和 Min 取值

参量	Max	Min
风速/(m · s ⁻¹)	9.00	3.00
液态水含量/(g · m ⁻³)	3.00	0.04
降雨强度/(mm · h ⁻¹)	15.00	0.50

3.2 仿真结果

仿真使用的导线型号为 LGJ-210/50, 导线直径为 20.38 mm, 导线密度为 2811 kg/m³, 冰的密度取值 0.6 × 10³ kg/m³。

仿真过程如下:

- 1) 根据式 (18) 设计模拟仿真数据;
- 2) 根据式 (1) 计算等效覆冰厚度;
- 3) 根据式 (2) 和式 (4) 计算拉力传感器的值;
- 4) 根据式 (6) 计算液态水含量;
- 5) 取前 10 个值作为 GM(1,1) 模型的输入值, 根据式 (14) 计算 $a、b$;

6) 根据式 (16) 计算前 10 个时刻的模型值, 并计算残差;

7) 计算第 11 至第 14 个时刻的预算值, 并计算偏差;

8) 根据式 (2) 和式 (4) 计算第 1 至第 14 个时刻的重量, 计算模型值的残差和预测值的偏差。

根据上面的仿真过程, 计算 20 次数据, 并列重量残值平方和最小值与最大值结果, 残值平方和最小值如表 2 所示, 残值平方和最大值如表 3 所示。

从上述仿真结果可以看出, 超短期预测结果与实际值相吻合, 验证了所提方法的有效性。

4 结 语

对即将工程应用的实时在线融冰技术, 探究了超短期精准预测方法, 以对实时在线融冰过程进行最优控制, 取得了如下结果:

- 1) 设计了模拟导线监控系统, 为精准预测提供实时数据;
- 2) 针对难以测量的液态水含量, 根据模拟导线监控系统测量参数, 推导液水含量计算公式;

表2 残值平方和最小值														
次序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
风速	0.02	0.01	0.05	0.02	0.03	0.01	0.04	0.05	0.05	0.03	0.02	0.06	0.01	0.03
降雨强度	0.04	0.03	0.02	0.01	0.05	0.02	0.01	0.04	0.02	0.05	0.05	0.03	0.06	0.01
液态水含量	0.04	0.01	0.02	0.04	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.03	0.04	0.02	0.05	0.03
重量	0.01	0.01	0.05	0.04	0.01	0.02	0.06	0.05	0.01	0.01	0.04	0.03	0.04	0.02

表3 残值平方和最大值														
次序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
风速	0.08	0.13	0.10	0.08	0.14	0.13	0.10	0.11	0.08	0.09	0.13	0.08	0.14	0.09
降雨强度	0.09	0.12	0.11	0.08	0.12	0.14	0.13	0.08	0.14	0.09	0.14	0.10	0.09	0.12
液态水含量	0.07	0.14	0.08	0.07	0.11	0.13	0.10	0.08	0.14	0.14	0.09	0.07	0.13	0.09
重量	0.14	0.06	0.11	0.12	0.10	0.14	0.12	0.11	0.11	0.09	0.10	0.09	0.13	0.13

3)提出了风速、降雨量、液态水含量超短期预测方法,并以风速、降雨量、液态水含量预测值为基础提出了超短期覆冰趋势预测方法;

4)提出了仿真数据模型,并根据仿真数据模型对所提出的超短期覆冰趋势预测方法进行了验证。

上面的研究仅仅基于仿真方法,尚缺乏实测数据,希望今后能开展实验室数据测试和现场数据测试,以检验预测的有效性。此外,由于实际导线中流经电流,更精确的分析需在模拟导线模型中考虑实际导线电流产生的热量。

参考文献

[1] M. Huneault, C. Langheit, R. S. Arnaud, et al. A Dynamic Programming Methodology to Develop De-icing Strategies during Ice Storms by Channeling Load Currents in Transmission Networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1604-1610.

[2] Liushunxin, Guo guangsong, Yan lichao, et al. Research on Conductor Icing of Overhead Transmission Lines [C]. 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), IEEE, 2011: 606-609.

[3] 赵彬,程永锋,王景朝,等. 阻尼间隔棒及双摆防舞器对特高压架空输电导线覆冰舞动特性的影响[J]. 高电压技术,2016, 42(12):3837-3843.

[4] 毕茂强. 分裂导线电流转移循环融冰试验与方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.

[5] 陈亮,李兴源,傅闯. 基于等风险度法的电网直流融冰计划决策[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2017, 47(2):158-164.

[6] 陆佳政. 电网覆冰灾害及防冰技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2016.

[7] 莫思特,刘天琪,李碧雄. 一种自融冰导体及其融冰设备:中国, CN201610867150.1[P]. 2016-09-30.

[8] Lu J Z, Zhang HX, Fang Z, et al. Research and Engineering Application of Power Grid Large-scale Ice-disaster Prevention and Treatment Technology[C]. CIGRE,2014.

[9] Xu X J, Lu J Z, Zhang H X, et al. Short-term Winter Icing Climate Prediction Based on the Polar Vortex Area and the Subtropical High[C]. Proceeding of the 15th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS 2013), Montreal, Canada, 2013.

[10] Bernstein B. C. Regional and Local influences on Freezing Drizzle, Freezing Rain, and Ice Pellet Events[J]. Wea. Forecasting, 2000,15(5):485-508.

[11] 张庆云,宣守丽,彭京备. La Nina 年冬季亚洲中高纬环流与我国南方降雪异常关系[J]. 气候与环境研究,2008,13(4):385-394.

[12] Zhou W, Johnny C L C, Wen C, et al. Synoptic-scale Controls of Persistent Low Temperature and Icy Weather over Southern China in January 2008 [J]. Monthly Weather Review,2009,137(11):3978-3991.

[13] 李崇银,扬辉,顾薇. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析[J]. 气候与环境研究,2008,13(2):113-122.

[14] Jones K F. A Simple Model for Freezing Rain Ice Loads [J]. Atmospheric Research,1998,46(1-2):87-97.

[15] Degaetano A T, Belcher B N, Spier P L, et al. Short-term Ice Accretion Forecasts for Electric Utilities Using the Weather Research and Forecasting Model and A Modified Precipitation-type Algorithm[J]. Wea. Forecasting, 2008,23(5):838-853.

(下转第70页)

计及剩磁、合闸电阻及选相合闸策略的 励磁涌流仿真评估方法

周 波,常晓青,张 华,魏 巍,史华勃
(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘 要:长链式薄弱电网中,变压器空载励磁涌流是制约电力系统和用户设备安全稳定运行的重要因素。首先针对剩磁评估、合闸电阻及选相合闸技术相结合的励磁涌流综合抑制措施进行介绍,并详细分析3种措施相互配合对励磁涌流的影响。最后,基于PSCAD仿真平台,搭建藏中联网工程电磁暂态模型并提出剩磁准确添加方法。空充主变压器励磁涌流试验结果与仿真结果高度吻合,充分验证了所提励磁涌流仿真评估方法的有效性。

关键词:励磁涌流;剩磁;合闸电阻;选相合闸;仿真评估

中图分类号:TM41 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)06-0037-04

Evaluation Method for Inrush Current Simulation Considering Residual Flux, Closing Resistance and Phase – controlled Switching Strategy

Zhou Bo, Chang Xiaoqing, Zhang Hua, Wei Wei, Shi Huabo
(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The inrush current of transformer has a major influence on the stability and safety of power grid and load equipment. The evaluation of residual flux, together with the application of closing resistance and phase – controlled switching strategy, has formed a comprehensive suppression measure with inrush current, which is explained in detail. Also, how the coordination among the three methods mentioned above can impact on inrush current is given. Finally, based on PSCAD, the transient simulation model of Mid – Tibet interconnection project is established with a careful consideration of residual flux to evaluate the inrush current. Considering the amplitude and change trend of inrush current, the experiment result is a high coincidence with that of the simulation result. And the effectiveness of the proposed evaluation method is verified.

Key words: inrush current; residual flux; closing resistance; phase – controlled switching strategy; simulation evaluation

0 引 言

变压器空载合闸投运时,由于铁心材料的非线性,在暂态直流偏置磁链作用下,易进入饱和区,形成励磁涌流。较大的励磁涌流不仅可能诱发变压器保护误动,还会产生较大的机械应力,造成变压器绕组变形,影响变压器使用寿命。同时,励磁涌流含有丰富的谐波分量,其在电网中的传播有可能引起节点电压谐波畸变,对电能质量敏感装置运行产生不利影响。此外,在长链式电网中,谐波传递还易引发谐振过电压,对用户设备安全运行构成威胁。在电网相对薄弱地区,鉴于励磁涌流的危害,已广泛采用

相应励磁涌流抑制措施,主要包括消磁、加装合闸电阻和选相合闸技术。主变压器合闸励磁涌流的大小也取决于抑制措施的实施效果。

目前,已有大量学者对励磁涌流开展研究,取得了丰富的成果。文献[1]提出一种基于磁滞回线的消磁方法,但其有效性尚缺乏实际的量化佐证。文献[2]提出基于 Preisach 模型的剩磁计算方法,但其实现需依托于大量实验数据的复杂运算。文献[3]给出一种基于电压积分法的剩磁评估方法,而该方法高度依赖于电压互感器的量测精度。文献[4]提出一种基于延时合闸策略的选相合闸技术,但由于开启动作离散性和预击穿的影响,其有效性会受到极大影响。文献[5]提出一种计及剩磁的励磁涌流仿真方法,但其施加剩磁的方法和作用效果缺乏试验验证。

下面首先分析了励磁涌流产生的机理,而后介绍了励磁涌流仿真评估约束条件,包括基于电压积分法的剩磁评估方法、主变压器断路器加装合闸电阻的涌流抑制措施和基于延时合闸的选相合闸技术。接着,阐述了剩磁、合闸电阻和延时合闸策略的配合关系。最后,基于 PSCAD 仿真平台,提出剩磁施加方法,并基于现场实测结果开展励磁涌流仿真评估方法验证,同时也为消磁效果评价提供了一种方式。

1 励磁涌流产生机理

变压器空载合闸时,由于磁链守恒定律,铁心工作磁链会产生暂态直流偏置(偏置大小取决于合闸相角)^[4]。以单相变压器为例,假设合闸时刻变压器铁心剩磁为 ψ_r ,外施电压有效值为 U_m ,角频率为 ω ,初始相角为 δ 。采用电动机惯例,则合闸后回路电压方程满足:

$$\begin{cases} \psi = L \cdot i \\ \frac{d\psi}{dt} + R \cdot i = U_m \sin(\omega t + \delta) \end{cases} \quad (1)$$

式中: L 为回路电感(包含变压器漏感和励磁电感); R 为回路电阻(包含合闸电阻、变压器绕组电阻和励磁支路等效电阻)。

因此,变压器铁心磁链满足:

$$\psi = -\psi_m \cos(\omega t + \delta) + (\psi_r + \psi_m \cos\delta) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (2)$$

式中:

$$\psi_m = \frac{LU_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (3)$$

铁心工作磁链的偏置易造成铁心进入饱和区,导致激磁回路电感减小。在变压器端口外加工频交流源的作用下,励磁电流上升,形成励磁涌流。以图 1 合闸角度和励磁引起的暂态磁链变化为例说明,正常情况下电网虚拟磁链跟随电网电压变化,且滞后 90° 。若变压器在电压 72° 时合闸,则变压器将产生正向暂态直流偏置,其磁链工作曲线整体上移 0.31 p.u. ;若继续考虑 40% 正向磁链,则该曲线将继续上移 0.4 p.u. (实际中由于变压器磁化曲线的非线性,偏置后的磁链曲线表现为平顶波)。

设定变压器拐点磁链为 1.1 p.u. ,随着电压变化,磁链超出 1.1 p.u. 时即进入饱和区产生励磁涌流,而后又退出饱和,涌流消失,回归正常励磁电流。因此励磁涌流呈现出间断尖顶的特点,其宽度与处于饱和区的时间相关,而最大值出现在磁链最大时刻。

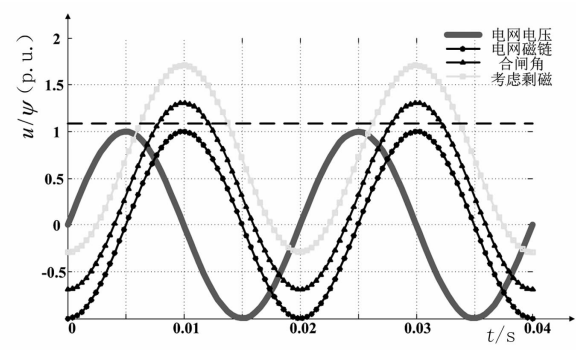


图 1 合闸角度和剩磁引起的暂态磁链变化

2 励磁涌流仿真评估约束条件

2.1 基于电压积分法的剩磁评估方法

若不考虑 CVT(电容式电压互感器)传变特性影响,则变压器剩磁可由断路器开断前后电压波形积分获取,如式(4)所示。

$$\psi_r = \psi_r(0) + \int u_r dt \quad (4)$$

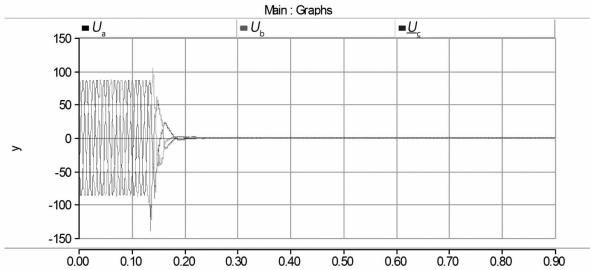
式中: $\psi_r(0)$ 为初始磁链; u_r 为变压器 CVT 瞬时电压。为保证开断前磁链初值为 0 ,应自电压最大值处开始积分。考虑到开断后断路器断口电容耦合作用、CVT 测量元件误差及变压器杂散电容等因素影响,开断一段时间后 CVT 测量结果不可信,因此电压测量积分终点宜选取为开断后约 1 s 左右,此时,电压暂态衰减过程基本结束。

以藏中联网工程巴塘站 4 号主变压器第 4 次开断为例,开断前后主变压器电压波形和磁链波形如图 2 所示。开断后约 0.85 s ,变压器 A、B、C 三相剩磁分别为 -28.3% 、 -6.4% 和 27.5% 。

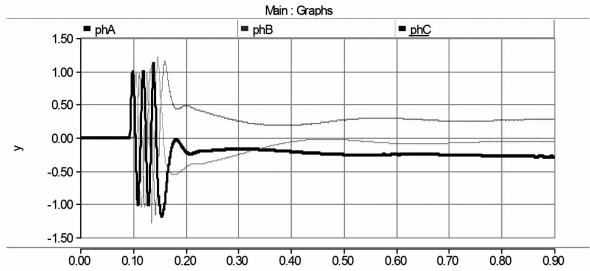
2.2 合闸电阻

带合闸电阻断路器装置示意如图 3 所示,其中 R_1 为合闸电阻, D_1 为辅助触头, D_2 为主触头。合闸命令发出后, D_1 先合闸,合闸电阻投入并作用一段时间,而后 D_2 合闸,合闸电阻旁路退出运行, D_1 再分闸。

目前,500 kV 断路器合闸电阻设计值约为 1000 ~ 1500 Ω 。受制造工艺和热容量等因素限制,其投入时间普遍在 8 ~ 12 ms。合闸电阻的投入不仅有助于增大暂态过程励磁回路阻抗,限制励磁涌流,也可增大系统阻尼,加快励磁涌流衰减。



(a) 电压曲线



(b) 磁链曲线

图 2 开断前后变压器电压和磁链变化曲线

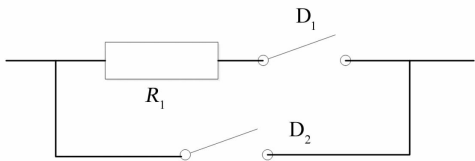


图 3 带合闸电阻断路器装置

2.3 延时合闸策略

选相合闸技术是限制励磁涌流的重要措施,而考虑到变压器铁心三相剩磁不同,常采用延时合闸策略。以首合变压器 A 相为例(后续分析均以 A 相作为首合相),该策略在 A 相合闸后(若不考虑剩磁,最佳合闸点为电网电压 A 相最大值处),延时 3 ~ 4 个周期后在 A 相电压过零点同时合 B、C 两相。原因在于变压器普遍采用 Y/Y/D 接法,A 相高压侧合闸后在其低压侧绕组感应电压,由于低压侧绕组角接,变压器 B、C 两相绕组进行分压再感应回该两相的高压侧,使得变压器 B、C 两相高压侧电压瞬时值均为 A 相电压的一半,相位相反。虽然变压器 B、C 两相剩磁不同,但感应电压作用 3 ~ 4 个周期后,其磁链均衡化,大小为 A 相磁链一半,相位相反。而在 A 相电压过零时刻,电网侧 B、C 相虚拟磁链大

小为 A 相磁链一半,相位相反。根据磁链守恒定律,此时合闸,B、C 相涌流将最小。

3 配合关系

采用延时合闸策略时,A 相首合后,该相磁链工作曲线与合闸角度及剩磁大小、方向密切相关,也是决定励磁涌流大小的关键。以 A 相电压正半周为例(负半周的关系同理),A 相开关的理想合闸相角为 90° ,考虑到开关动作离散性和预击穿特性的影响,其可能的合闸角将落在 $90^\circ \pm 90^\circ$ 的区间上,对应为正半周,存在一个上升沿和下降沿。

同样以图 1 为例说明,采用电动机惯例,设定 A 相参考的电网基准电压在 $t = 0$ 时刻上升沿过零点。此时,如果在电压上升沿合闸,将产生正向的暂态直流偏置磁链,若此时剩磁方向为正,将加剧合闸后变压器 A 相工作磁链的正向偏移,引起励磁涌流的增加;若剩磁方向为负,将抵消掉部分变压器 A 相工作磁链的正向偏移,进而减小励磁涌流。

若在电压下降沿合闸,将产生负向的暂态直流偏置磁链,若此时剩磁方向为正,将抵消掉部分变压器 A 相工作磁链的正向偏移,进而减小励磁涌流;若剩磁方向为负,将加剧合闸后变压器 A 相工作磁链的正向偏移,引起励磁涌流的增加。

而如果暂态直流偏置磁链和剩磁叠加后使得 A 相工作磁链正向偏移,则涌流峰值出现的时刻将在合闸后 A 相电压的下一个下降沿过零点,该点与初始合闸点的时间差在 5 ~ 10 ms;若叠加后使得 A 相工作磁链负向偏移,则涌流峰值出现的时刻将在合闸后 A 相电压的下一个上升沿过零点,该点与初始合闸点的时间差在 10 ~ 15 ms。

因此,考虑到合闸电阻投入时间限制,为保证在磁链绝对值最大值处合闸电阻的有效投入,限制空充励磁涌流,应首选在 A 相上升沿合闸。同时考虑到开关动作离散性(约为 ± 1 ms),合闸时刻宜调整为 72° 及以下,具体可视剩磁大小和方向定。

4 考虑剩磁的仿真分析

藏中联网工程中 500 kV 主变压器大量采用了合闸电阻和选相合闸相结合的涌流抑制措施。同时,500 kV 主变压器首次空充前均采取了消磁措

施,后续开断录波也为剩磁评估创造了条件。为评估藏中联网调试和运行期间存在的励磁涌流风险,基于PSCAD搭建了藏中联网工程东线电磁暂态仿真模型,其结构如图4所示。图中木里、水洛、乡城、巴塘、芒康均为500 kV变电站,四川侧主网在500 kV月城站做等值,乡城、水洛和木里变电站220 kV侧上网水电均搭建了详细模型并调整为与充电时段对应的运行方式。

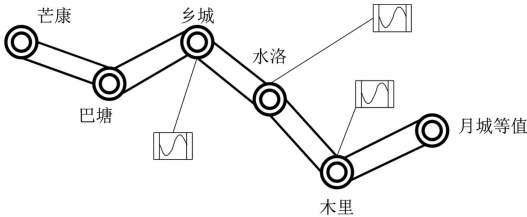


图4 仿真网架

PSCAD 仿真平台提供了变压器饱和模型,而剩磁的准确施加对于励磁涌流仿真分析具有重要意义。

根据式(1),电网电压和电网虚拟磁链分别满足:

$$\begin{cases} u = U_m \sin(\omega t + \delta) \\ \psi = \psi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2} + \delta) \end{cases} \quad (5)$$

假定空充主变压器操作前某一稳态时刻 T_0 ,电网电压A相处于上升沿过零点,则电网电压A相初始相角 δ 满足:

$$\delta = -\omega T_0 \quad (6)$$

PSCAD 中剩磁的施加依靠外加电压源作用,通过控制外加电源的幅值和相位控制首合相剩磁大小,在合闸时刻切除外加电源而接入系统电压,设外施电压源满足:

$$u_{rem} = U_r \sin(\omega T\alpha + \delta) \quad (7)$$

式中: U_r 为外加电源幅值; α 为外加电源相对于电网电压的相位差。

为使A相剩磁稳定,需使合闸时刻外加电源A相虚拟磁链正好处在对应方向的峰值,若剩磁为负,则为负峰值,反之亦然。假设剩磁为某一值 X ,则要求剩磁满足:

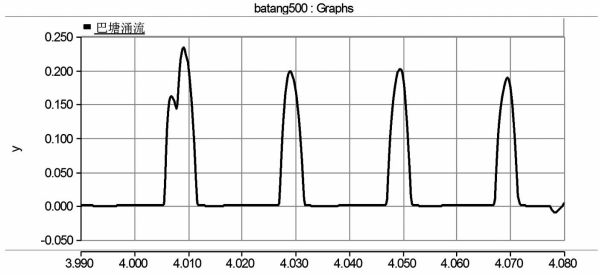
$$\psi_r = |X| \sin(\omega T - \frac{\pi}{2} + \alpha + \delta) = X \quad (8)$$

据此可得

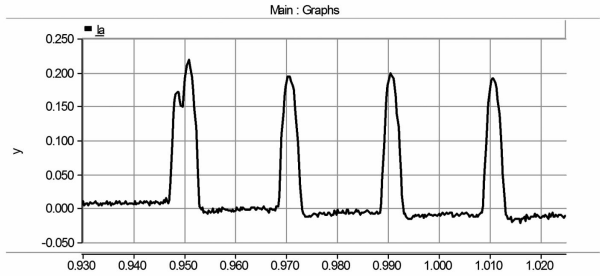
$$\alpha = \arcsin(\frac{X}{|\psi_r|}) + \frac{\pi}{2} - \omega T - \delta \quad (9)$$

以巴塘4号主变压器第4次合闸为例,断路器合闸电阻为1500 Ω ,A相合在过零点后0.1 ms,合闸电

阻投入时间为8.6 ms;B相延时80 ms后,合在A相过零点前2.1 ms,合闸电阻投入时间为10.9 ms;C相延时80 ms后,合在A相过零点前2.1 ms,合闸电阻投入时间为10.9 ms。根据第4次分闸后剩磁评估结果,A相剩磁-23%。由于第4次空充时,充电断路器为首合,动作时间按照厂家提供的静态试验值整定,与实际存在较大差别,造成A相基本合在了上升沿过零点。计算获取外加电源相角差为12.6°。



(a) 仿真计算励磁涌流波形



(b) 实测励磁涌流波形

图5 励磁涌流评估仿真和实测对比

仿真中A相励磁涌流第1个波峰峰值为231 A,实测中A相励磁涌流第1个波峰峰值为218 A,仿真相对实测误差仅为6%。此外,两者波形变化趋势保持高度一致,充分证明了基于电压积分法的剩磁评估方法和PSCAD变压器饱和模型的可用性,以及所提剩磁施加方法的正确性,为变压器合闸励磁涌流评估以及主变压器消磁效果评价提供了一种手段。

5 结 语

针对长链式薄弱电网励磁涌流防控需要,在计及剩磁、合闸电阻及延时合闸策略的基础上,分析了三者之间配合关系对励磁涌流的影响,进而给出了优化的合闸策略。同时,基于PSCAD平台搭建了藏中电网详细电磁暂态计算模型,提出用于励磁涌流评价的剩磁施加方法,仿真和实测对比高度吻合,充

(下转第74页)

区域电网电压暂降分析及评估方法研究

李 训¹, 许 可², 肖 丽²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司绵阳供电公司, 四川 绵阳 621000)

摘 要:首先介绍了电压暂降的概念以及造成电压暂降的原因,并提出了敏感设备曲线的概念。根据绵阳某区域现场实测数据,结合 PLECS 仿真分析造成该站点电压暂降的原因,进而选择合理的缓解措施对该变电站改善后的电压暂降事件进行了预估计。最后,讨论了电压暂降事件在敏感设备曲线上的分布情况,给用户选择敏感设备提出了建议。

关键词:电压暂降;敏感设备曲线;缓解措施

中图分类号:TM714 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)06-0041-06

Analysis of Voltage Sag in Regional Power Grid and Research on Its Evaluation Method

Li Xun¹, Xu Ke², Xiao Li²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Mianyang Electric Power Supply Company, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract: Firstly, the concept of voltage sag and the cause of voltage sag are introduced, and the concept of sensitive device curve is put forward. According to the measured data in a field of Mianyang, the causes of voltage sags caused by the site are analyzed by PLECS simulation, and the reasonable mitigation measures are selected to estimate the voltage sags after the improved substation. Finally, the distribution of voltage sag events on the sensitive device curve is discussed, and the suggestions are proposed for users to select sensitive devices.

Key words: voltage sag; sensitive equipment curve; mitigation measures

0 引 言

随着电力系统、计算机的高速发展,近年来,国内外的学者越发认识到电能质量的重要性,其中,电压暂降问题所造成的影响在所有电能质量问题中最为严重。例如电压暂降会造成大型工业用户设备停运、误动作,从而造成巨大的经济损失^[1-2]。电压暂降不仅会造成巨大的经济损失,还会造成人员的意外伤亡,例如电梯运行故障、医疗故障等^[3]。因此,研究电压暂降具有重要的理论价值和现实意义。文献[4]指出类别不同的电压暂降情况会由不同类型的短路故障造成。文献[5]指出可调速驱动器、双馈异步风力发电机等敏感设备的运行状态会受到

类别不同的电压暂降影响。文献[6]指出在寻找故障点、检查敏感设备工作状态时,进行必要的电压暂降记录的作用。文献[7]指出静止同步补偿器对于电压暂降造成的影响可以随着电压暂降程度进行一定的补偿。

针对电压暂降的问题,国内外学者主要从幅值、持续时间和相位跳变 3 个特征量展开大量研究,但在方案设计中,若未能将暂降幅值、持续时间、电压相位、相位跳变、相位不对称、暂降幅值不对称、波形畸变与暂态等特征量进行描述^[5],则难以准确评估电压暂降的影响。因此,除了对电压暂降基本的特征量进行准确描述,还需对暂降区段其余的特征量进行全面准确描述^[8]。

如何缓解电压暂降问题并采取有效的措施是一

个难点。为了解决这些问题,下面以绵阳区域电网某 220 kV 配电系统为例,建立了仿真模型。通过与现场实测数据进行对比,分析了该区域电压暂降的原因,提出了相应的缓解措施,对改善后的效果进行预估计,利用仿真结果在敏感设备曲线上绘图,研究各类设备的敏感性以达到对该区域的电压暂降评估分析的目的。

1 电压暂降的相关理论

1.1 电压暂降的概念

电压暂降时间是指在很短的时间内,系统供电的电压有效值的跌落现象。电压暂降的重要指标包括暂降的持续时间、在跌落过程中幅值的变化、暂降前后电压的相位变化。1)在整个暂降的过程中,定义跌落电压有效值与额定电压有效值的比值为电压暂降的幅值。2)电压暂降持续时间即电压暂降起止时刻的差值^[9-16]。电压暂降的持续时间范围一般在 0.5 ~ 1 min 之间。3)电压暂降的相角跳变即电压暂降前后相位角的变化大小^[17-18]。此外,暂降频次也是表征电压暂降的重要指标。必须将电压暂降持续过程的时间、电压暂降发生的频率以及暂降幅值大小等因素一同整体考虑。

1.2 电压暂降的产生原因

在电能的输送和分配的系统中,引起电压暂降问题的主要原因有^[19]:大型异步电动机驱动、雷电、通断动作、线路短路^[20]。其他原因包括:多个串、并联的电容器组、变压器组的使用等。

1.2.1 大型异步电机驱动带来的电压暂降

异步电动机及各局部电网的容量都会影响电压暂降的程度。作为电网中的主要负荷,感应电动机占据的用电量超过 60%,而过大的异步电动机的驱动电流(通常是额定电流的 5 ~ 6 倍)会造成持续时间较长、幅值超过 0.85 p. u. 的电压暂降。但是用户却不会受到很大的影响^[21]。

1.2.2 变压器投切造成的电压暂降

由于铁心的非线性,引起电压暂降的原因归结为空载变压器投切时产生很大的磁化电流^[9,22]。因为不同的三相变压器饱和程度不同,所以电压暂降在每一相的幅值大小也不同。电压暂降幅值与铁心中的剩磁和网络阻尼、电源强度、开关合闸时刻等因素有关。通常,由变压器投切造成的电压暂降在

85% 以上^[9,20,23]。

1.2.3 短路故障造成的电压暂降

通常单相、两相、三相的接地短路故障涵盖了输配电线路的故障类别。对于三相短路故障而言^[24],会引起对称的电压暂降。但是对于不对称故障,各相电压幅值、相角跳变不相同。当系统发生了短路故障时,各母线会发生不同程度的电压暂降,暂降程度和故障点间的距离长短相关,甚至邻线用户将再经受一次电压暂降。而单相短路故障在各种电力系统的短路故障中发生的可能性最大^[9,23,24]。各种敏感设备也会因此跳闸甚至产生误动作。而三相短路故障虽然发生的可能性很小,但是其危害极其严重。

电压暂降的严重程度主要由以下条件制约:各网络节点和故障点的远近、各种变压器组的事故发生位置、连接方式、故障点周围有无电源、整个线路的阻抗情况、电压暂降前后故障点的电压情况、断路器通断的快慢、保险丝的熔断时间长短、各变压器组的失效率,还有系统规定的自动重合闸的重置次数等。

1.3 ITIC (信息技术工业协会) 曲线

敏感设备的敏感程度与电压暂降的影响密切相关。不同的用电设备或负荷对于同一电压暂降的耐受程度不同,因此不同的设备应当采用不同的敏感曲线。不同的敏感曲线由制造业的垄断联盟所规定,各大公司常采用的曲线有:ITIC 曲线、SEMIF47 曲线、接触器类设备敏感曲线、变频驱动类设备敏感曲线^[12,25]。

ITIC 曲线最早在 1980 年由美国的敏感设备生产组织提出。为了预防计算机等敏感设备受到电能质量问题的影响,ITIC 曲线用于直观地描述计算机设备承受电力系统的电压变化持续时间和幅值的能力,而最早的 ITIC 曲线绘制参考了大量的实验数据、计算机的记录等。对于其他敏感设备曲线,可参照 ITIC 曲线并视实际情况制定^[26,27]。

ITIC 电压容限曲线的横坐标同时标示了系统的周波(c)单位和时间(s、ms、μs)单位^[10],该曲线是目前暂态电能质量事件评估的重要依据,如图 1 所示。获取设备敏感曲线最简单的方法是通过试验或评估的方法得到,也可以向设备制造商索取^[10,28]。

电压暂降发生的次数与敏感设备运行之间的联系可以由记录的电压暂降的幅值、持续时间长短等特征绘成敏感曲线,从而很直观地反映出来。

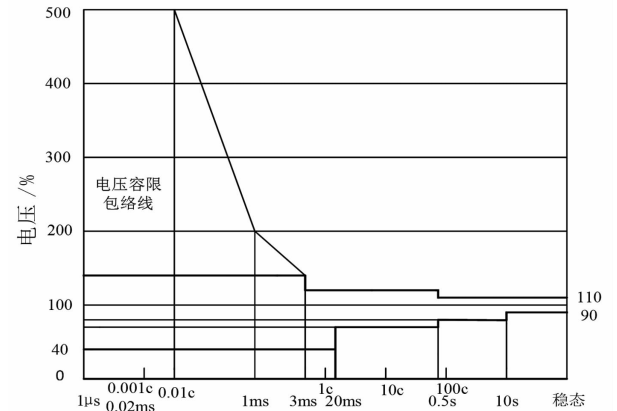


图 1 ITIC 电压容限曲线

1.4 蒙特卡洛故障概率估计

蒙特卡洛法是在数学概率的模型基础上,通过统计学得出所需参数的近似解。蒙特卡洛法适用于非常复杂的系统,对于解决随机性问题有着良好的效果。

在电压暂降的短路故障中,蒙特卡洛法首先要对故障进行概率描述,即对 A、B、C 三相短路情况加以描述,例如单相、两相、三相的短路情况并加以组合;然后从现实概率分布抽样,即借助随机序列的思想对构造的故障抽样;最后建立各种估计量,从而得到问题的解。随机数 i 的概率模型用式(1)表示。

$$F_T = \begin{cases} 1, i < P_{3L} \\ 2, P_{3L} \leq i < P_{3L} + P_{AB} \\ \dots \\ 10, P_{3L} + P_{AB} + \dots + P_{BG} \leq i \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{3L} 、 P_{AB} 、 P_{BG} 分别为各种故障发生的概率; i 在 $(0,1)$ 上服从均匀分布。

设 L_i 为第 i 条线路的总长度, m 为线路数,整个系统中第 i 条线路发生的故障概率为^[4]

$$P_i = \frac{L_i}{\sum_{i=1}^m L_i} \quad (i = 1 \sim m) \quad (2)$$

随机数 j 的概率模型用式(3)表示。

$$F_L = \begin{cases} 1, j < P_1 \\ 2, P_1 \leq j < P_1 + P_2 \\ \dots \\ m, P_1 + P_2 + \dots + P_{m-1} \leq j \end{cases} \quad (3)$$

式中:变量 j 在 $(0,1)$ 上服从均匀分布; P_m 为整个系统中第 m 条线路发生故障的概率。

可以将线路故障看作服从均匀概率分布,整个系统中线路发生故障的概率为^[24]

$$P_{\text{uniform}} = \frac{1}{m} \quad (4)$$

式(5)表示在不同概率下随机数 j 的故障类型^[24]。

$$F_L = \begin{cases} 1, j < P_{\text{uniform}} \\ 2, P_{\text{uniform}} \leq j < 2P_{\text{uniform}} \\ \dots \\ m, (m-1)P_{\text{uniform}} \leq j \end{cases} \quad (5)$$

实际线路长度大于 10 km 时,可将整个线路分割为多个 10 km 的小线路段,即在式(4)中增加线路数,同时将该条线路中几个点看作是故障点进行计算^[24]。

2 某区域电网敏感负荷电压暂降监测与仿真分析

下面以绵阳某 220 kV 变电站为例进行介绍,其他站点分析类似。该变电站的用户为某研究院,系统变电站的线路中包含 1 个 220 kV 变电站和 2 个 110 kV 站。其中,各边电压暂降监测点部署方案为系统侧安装数量为 1 台,用户侧安装数量为 3 台,无线模块数量为 2 个。

监测线路选择在该变电站 10 kV 母线 I 段和 10 kV 母线 II 段。电压暂降仪安装于两段母线电压的端子排上。该变电站一次接线如图 2 所示。

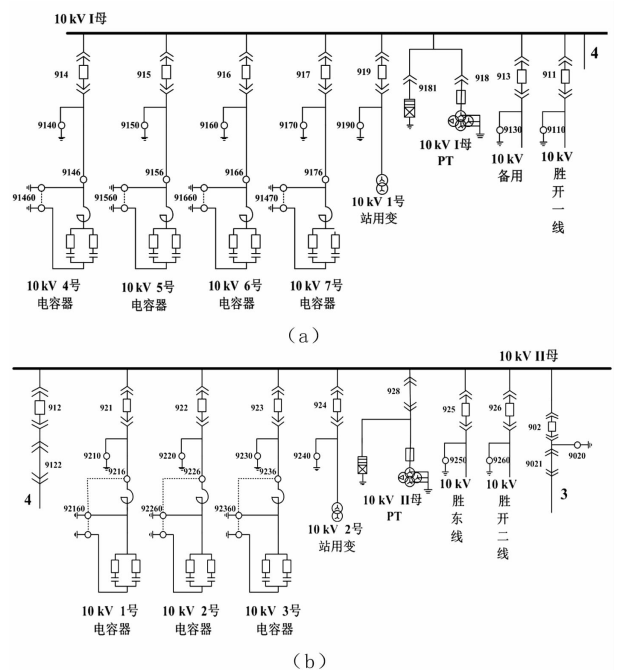


图 2 某 220 kV 变电站一次接线

在 10 kV I 母观察电压暂降发生情况,将仿真测试与现场测试记录进行对比,来探讨电压暂降问题。

图3 为10 kV I 母监测点在不同电压暂降事件下对应时段的监测电压波形。

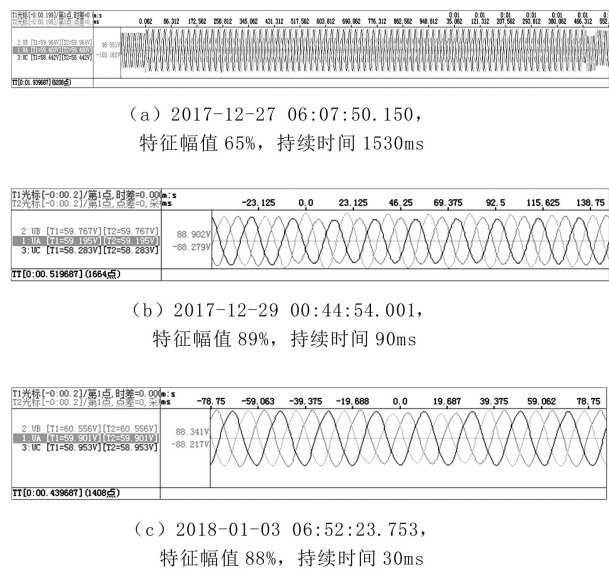


图3 10 kV I 母电压暂降记录波形

图4 为按照220 kV 变电站的一次接线图在PLECS 环境下模拟相应10 kV I 母电压发生暂降的仿真波形。

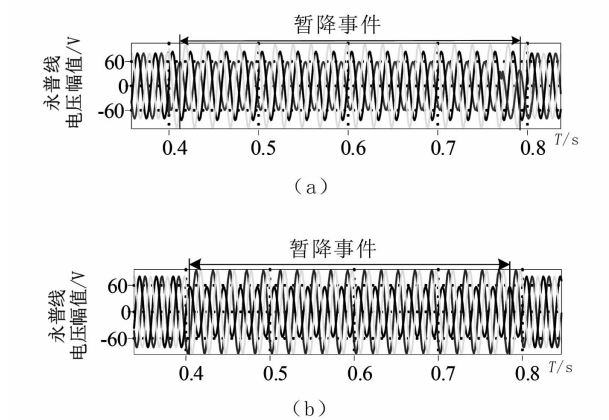


图4 10 kV I 母发生电压暂降的仿真波形

可以看出,电压暂降深度约为20%,持续时间约为2~15 个周波,根据仿真分析及监测数据可总结出短路故障引发电压暂降的典型特征如下:

- 1)电压暂降发生后恢复过程迅速,基波电压有效值变化过程大致呈矩形;在整个故障期间,可能出现多次暂降;电压暂降幅值在突变点之间基本保持不变,而只在开始与结束瞬间发生了突变^[13-22]。
- 2)不同类型的短路故障会导致不同程度的三相电压暂降。三相对称短路故障会造成各相电压暂降同时开始,并且每相暂降幅值相等;其他类型的短路故障造成的电压暂降有时还伴随有电压暂升现象,并且三相幅值不相等。

3)电压暂降幅值一般不大于0.7 p. u. ,暂降持续时间与开启保护动作的时间相关。

上述典型特征与仿真模型的结果相符,验证了理论分析的结果。

3 电压暂降改善方案与评估结果

3.1 电压暂降的缓解措施

目前抑制电压暂降的方法主要是在电力系统与用户设备之间的接口处加装补偿装置,通过注入有功功率和无功功率来对系统的有功功率和无功进行补偿。常见的补偿装置有:动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)、不间断电源(uninterrupted power supply, UPS)、固态切换开关(solid state transfer switch, SSTS)、磁谐振变压器等。

其中,UPS 可以起到抑制电压暂降、电压中断的作用。当供电系统发生电压暂降故障时,转换开关会自行转换至 UPS 进行供电,从而抑制了电压暂降的影响。在实际的应用中,UPS 的电池容量决定了其保护时间,一般的 UPS 电池容量为1 kW~1 MW。

DVR 可以对电压暂降故障在短时间内进行补偿,对提高大型综合工业敏感设备的供电质量效果显著。SSTS 用于串联在电压敏感负荷和主、备用电源之间。当电压暂降故障发生时,SSTS 的切换指令由控制系统发出,此时敏感负荷自动切换至备用电源,从而抑制了电压暂降的影响^[30]。SSTS 适用于高压、中压和低压系统的电压暂降以及长期过电压和低电压的情况^[30-31]。

由于 UPS 的高昂售价,而 SSTS 以及磁谐振变压器仅能在部分的电压暂降幅值区段起到缓解作用,因此选用 DVR 对电压暂降问题进行缓解。

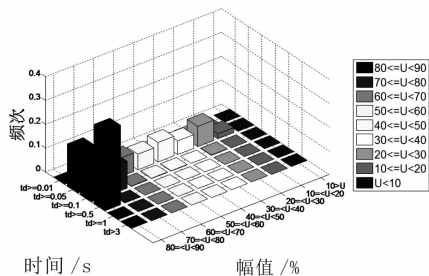


图5 10 kV I 母线经过改善后电压暂降三维分布^[12]

图5 对加装 DVR 之后在最大运行方式下的电压暂降幅值和时间分布情况进行了量化评估。可以看出,在最大运行方式下暂降事件发生在0.05~0.1 s

的频次较为集中;电压幅值为80%~90%的暂降事件频次也很集中;因此,需要对该变电站发生电压少量、长时间的暂降情况加以治理。

3.2 电压暂降事件在敏感区线上的分布

根据第2节所得到的仿真结果可以将电压暂降幅值与持续时间在敏感曲线上描点绘制分布图,以便直观地显示出敏感设备曲线与电压暂降频次的关系。图6至图9结合不同的敏感设备耐受曲线(包括ITIC曲线、SEMIF 47曲线、接触器类设备典型敏感曲线),分别形成了635次暂降事件在不同耐受曲线上的分布情况。在635次电压暂降事件中,IT-IC曲线反映的事件次数达到了218次,占整个事件的34.33%;SEMIF 47曲线反映的事件次数达到了298次,占整个事件的46.93%;接触器类设备典型敏感曲线反映的事件次数达到了501次,占整个事件的78.89%;变频驱动类设备典型敏感曲线反映的事件次数达到了0次,占整个事件的0%。

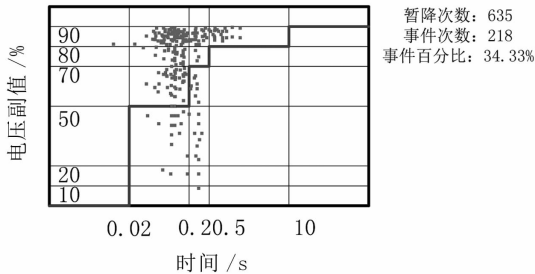


图6 ITIC 曲线

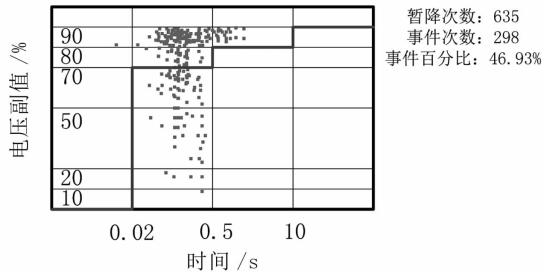


图7 SEMIF 47 曲线

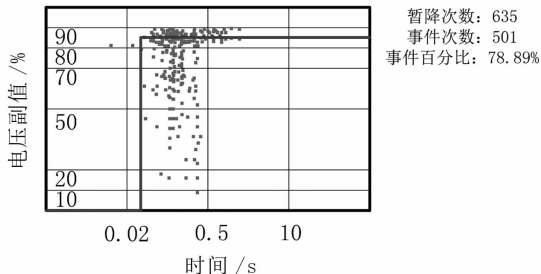


图8 接触器类设备典型敏感曲线

若设备对电压质量要求没有那么高,发生电压

暂降事件的次数就减少,则事件发生率也越低^[12],如图8所示的接触器类设备。因此用户在选择敏感设备时,该设备需要对电压暂降具备一定抗干扰的能力。

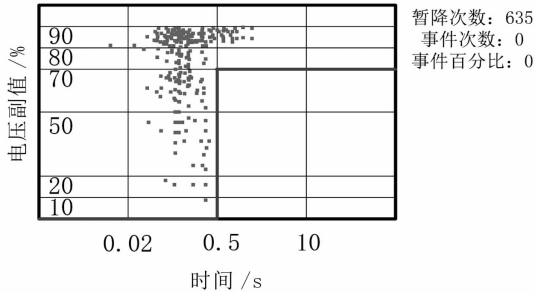


图9 变频驱动类设备典型敏感曲线

除此之外,在各个系统的运行方式中,电压暂降对于不同的敏感设备的影响不同。尤其当暂降次数超过一定的限值时,对于敏感设备的要求变得更高了,要求其必须能承受更高密度的暂降,而不具备这种要求的设备应少投入使用,如图9所示的变频驱动类设备。

4 结 语

前面从绵阳某区域电网的电压暂降实际问题出发,以绵阳地区某220 kV变电站为例,首先建立了该变电站的电路模型,对电压暂降事件进行了深入研究,并结合现场数据实测分析得出电压暂降事件的发生原因。进而对于电压暂降问题提出了缓解方案,对该变电站改善后的电压暂降事件进行了预估计。最后,讨论了敏感设备曲线上电压暂降事件的分布情况,为用户选择敏感设备提出了建议。

参考文献

[1] 韩英铎,黄民聪.信息电力与 FACTS 及 DFACTS 技术[J].电力系统自动化,2000,24(19):1-7.

[2] 徐永海,陶顺,肖湘宁.电网中电压暂降和短时间中断[M].北京:中国电力出版社,2015.

[3] 程浩忠.电能质量概论[M].北京:中国电力出版社,2013.

[4] B. Sawir, M. R. Ghani, A. A. Zin, et al. Voltage Sag: Malaysian's Experience[C]. International Conference on Power System Technology, Proceedings, Powercon, 1998(2):1421-1425.

[5] 孔祥雨.电压暂降特性及其对敏感设备影响评估研究[D].北京:华北电力大学,2014.

[6] 徐文远,雍静. 电力扰动数据分析学——电能质量监测数据的新应用[J]. 中国电机工程学报,2013,33(19):93-101.

[7] 黄小庆,曹阳,吴卫良,等. 考虑电压暂降指标的电压协调控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(22):147-154.

[8] M. F. Alves,T.N.Ribeiro. Voltage Sag:An Overview of IEC and IEEE Standards and Application Criteria[C]. Transmission and Distribution Conference, 1999(2):585-589.

[9] 刘云潺. 电压暂降检测方法的分析与研究[D]. 长沙:湖南大学,2007.

[10] 常学飞. 电力系统故障引起的电压暂降分析方法研究[D]. 济南:山东大学,2010.

[11] 吕伟. 基于凹陷域分析的电压暂降监测点优化配置研究[D]. 济南:山东大学,2011.

[12] 陈瑞. 电压暂降在配电网中的传播规律及仿真评估研究[D]. 北京:华北电力大学,2007.

[13] 魏荣进. 电压暂降检测与扰动源辨识方法的分析与研究[D]. 长沙:湖南大学,2012.

[14] 高琳. 电压骤降评估方法研究[D]. 济南:山东大学,2007.

[15] 赵贤. 电压闪变和暂降对电能计量的影响[D]. 保定:华北电力大学,2008.

[16] 王效孟. 电压暂降在线检测装置的研究[D]. 郑州:郑州大学,2010.

[17] M. H. J. Bollen. Characterisation of Voltage Sags Experienced by Three-phase Adjustable-speed Drives[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1997,12(4):1666-1671.

[18] Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems;BS EN 50160[S],2010.

[19] N. G. Hingorani. Introducing Custom Power[J]. IEEE Spectrum,1995,32(6):41-48.

[20] 王金丽,盛万兴,宋祺鹏,等. 配电网电能质量智能监控与治理仿真[J]. 电网技术,2014,38(2):515-519.

[21] 何维国,董瑞安,张孝银,等. 配电网中电压暂降源定位方法比较[J]. 电测与仪表,2011,48(8):53-58.

[22] 刘应梅,白晓民,王文平,等. 基于 Dyn 测度的电压暂降检测方法[J]. 电力系统自动化,2004,28(2):45-49.

[23] 任伟. 交-直-交变频调速系统仿真研究[D]. 郑州:郑州大学,2007.

[24] 易杨,张尧,钟庆. 基于蒙特卡罗方法的大型电力用户电压暂降评估[J]. 电网技术,2008,32(6):57-60.

[25] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

[26] 王玲,高倩倩,陶顺,等. 基于暂降类型判断的短路故障类型识别研究[J]. 电测与仪表,2013,50(6):8-13.

[27] 奚珣. 电能质量的更高要求及对策[J]. 供用电,2002,19(1):40-41.

[28] D. J. Won,S. J. Ahn,S. I. Moon. A Modified Sag Characterization Using Voltage Tolerance Curve for Power Quality Diagnosis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(4):2638-2643.

[29] 刘伟波. 固态开关关键技术仿真研究[J]. 市场周刊(理论研究),2013(3):142-144.

[30] 陈众励,许维胜. 电压中断与电压暂降的成因及其防治[J]. 电工技术学报,2015(51):518-520.

[31] Z. Wang,S. Wang,J. Qiu,et al. Induced Voltage Analysis of Superconducting Fault Current limiter[J]. Compel International Journal for Computation & Mathematics in Electrical & Electronic Engineering,2014,33(1/2):38-46.

作者简介:

李 训(1975),工程师,主要从事电网电压及谐波管理工作;

许 可(1981),高级工程师,主要从事变电运行及配电网管理工作;

肖 丽(1977),高级经济师,主要从事电压管理工作。

(收稿日期:2018-09-28)

=====

(上接第31页)

[11] 周凯,陶文彪,赵威,等. 以分子取向理论理解交联聚乙烯中水树在不同温度下的生长特性[J]. 高电压技术,2014,40(12):3665-3673.

[12] 黄明,周凯,杨滴,等. 在线注入有机硅修复液对交联聚乙烯电缆中水树生长的影响[J]. 电工技术学报,2016,31(21):176-182.

[13] Abderrazzaq M H. Development of Water Tree Structure in Polyester Resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2005,12(1):158-165.

[14] Wang Z,Marcolongo P,Lemberg J A,et al. Mechanical Fatigue as A Mechanism of Water Tree Propagation in TR-XLPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(1):321-330.

[15] A. Thomas,T. Saha. A New Dielectric Response Model for Water Tree Degraded XLPE Insulation - Part A: Model Development with Small Sample Verification [J]. IEEE Transactions. on Dielectrics&Electrical Insulation,2008,15(4):1131-1143.

作者简介:

冯 杰(1984),硕士、高级工程师,从事电力物资检测和研究工作;

李康乐(1990),博士,研究方向为高电压与绝缘技术。

(收稿日期:2018-07-25)

基于市场风险和风险偏好的购电商最优决策研究

严磊¹, 罗晓伊², 佟如意², 魏阳¹

(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, 四川 成都 610041)

摘要:结合前景理论刻画了购电商风险规避度,并在此基础上构建了考虑电力用户随机需求的购电商决策模型。通过求解和分析购电商的最优决策,量化分析了决策者风险偏好、市场风险、零售价格、批发价格、购电商成本对最优决策的影响,为风险规避型购电商在市场风险下的最优决策提供了新的指导和参考。

关键词:电力供应链;购电商;市场风险;风险偏好

中图分类号:F407.61 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)06-0047-05

Optimal Decision of Electricity Retailers Based on Market Risk and Risk Appetite

Yan Lei¹, Luo Xiaoyi², Tong Ruyi², Wei Yang¹

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

Abstract:The degree of risk aversion for electricity retailer is characterized with prospect theory under stochastic demand, and a decision model for optimal decisions is established for electricity retailer. Quantitative analysis is shown that the effect of decision-maker's risk appetite, market risk, retail price, wholesale price and the cost of electricity retailer on optimal decision. The conclusion provides a new way of optimal decision for the risk-averse electricity retailer in market risk.

Key words:electricity supply chain; electricity retailer; market risk; risk appetite

0 引言

电力行业是由众多相关企业组成的一个庞大网络系统,大致可以分为煤炭及电力设备生产、发电、输电、配电和电能销售等环节^[1-3]。随着电力行业中大用户直购电政策落地,购电商选择权放开,电力行业市场化竞争日益激烈。为了更好把握行业发展趋势,越来越多的学者开始用供应链思想来研究电力行业市场中的经营管理问题。从已有研究来看,现有研究主要基于供应链视角对不同市场结构下的电量分配组合策略与电价风险以及电力企业的最优决策展开。

在电量分配组合策略与电价风险方面,文献[4-5]用委托代理理论研究了具有激励相容特性的发电市场竞价机制设计。文献[6]应用竞价交易理

论探讨了发电企业、配电企业如何在输、配之间进行竞价,并基于上述行为关系设计了电力发配电市场的激励性双边合同。文献[7]对电力供应链的收益风险进行了深入考察,揭示了供电商可以通过采用期权对购电商进行激励。鉴于激励行为对电力供应链收益管理的重要影响,一些学者开始对基于非对称信息下的电力供应链激励契约机制进行考察。针对信息不对称所导致的可中断负荷管理低效问题,文献[8]构建了考虑激励相容的可中断负荷管理机制模型,认为供电企业用科学的激励措施可以引导用户在电力交易过程中自愿披露信息,提高了电力市场运行效率。在后续研究中,文献[9]在原有模型基础上,把用户类型作为细分变量,考虑供电企业的可中断负荷管理机制,发现可进一步提高激励机制的适用性。文献[10]则结合云南电力市场实际

情况,构建了激励相容与深度博弈相结合的市场机制模型,从“点对点”、“背靠背”和“面对面”3个层面对云南电力交易市场的构建与运行提出了针对性的建议。

在电力企业的最优决策研究方面,文献[11]采用效用函数与 Value - at - Risk 相结合的方法对购电商的长期购电方案及对应风险进行了考察,给出了最优的购电组合策略。文献[12]采用期望 - 方差分析法,对电力需求不确定性条件下供电公司的收益与风险进行考察,为输配分离下供电公司基于自身风险偏好的最优购电量选择提供了建议。文献[13]在划分风险偏好类型的基础上,采用 Conditional - value - at - risk 法构建了不同风险偏好影响下的供电商最优购电策略模型,揭示了供电商风险偏好组合与其购电组合之间最优的内在匹配关系。相类似的,文献[14]设计了考虑风险的电力市场直购电量合同,给出了最优的直购电量策略。随着研究的深入,一些学者开始注意到行为者风险偏好并不是一成不变的,它往往跟行为者的心理预期(即心理前景)有着紧密的关系^[15-16]。基于这一发现,学者们开始基于前景理论,对电力供应链中上下游电力企业之间的购售电决策进行进一步的考察。如文献[17]基于前景理论,构建了考虑发电商心理前景的电力分配模型,揭示了发电商心理前景对其最优电量分配策略的影响。文献[18]以买卖双方整体前景值最大化为目标,构建了清洁能源发电与火力发电相混合的发电权交易模型,考察了买卖双方的心理前景值与最优混合发电权交易之间的内在匹配关系。这为风险偏好影响下的电力企业最优决策研究提供了新思路。

综合而言,上述研究成果为新一轮电力体制改革下的电力企业高效运营提供了有益的指导。但同时应看到,已有研究结果主要侧重于单独的考察市场风险或电力企业风险偏好对其行为决策的影响,并未将电力市场风险和电力企业的风险偏好纳入到统一的分析框架中。在电力企业的现实运营中,电力企业的任何决策不仅需要考虑到市场需求的不确定性,还要考虑决策者自身的风险偏好或心理前景对决策的影响。基于这一背景,拟将市场风险和决策者自身的风险规避程度同时纳入到电力企业的购电

决策中,力图更好地揭示市场风险和电力企业自身风险规避程度对其购电决策的影响。下面首先采用前景理论刻画购电商的风险规避度,构建考虑用电户随机需求的购电商决策模型;其次求解购电商最优策略,量化分析决策者风险偏好、市场风险、电价(零售价格、批发价格)、购电商成本对最优决策的影响。

1 模型假设

目前,发电企业、电网公司和用户是中国电力市场中三大市场主体。为便于分析,这里所指的电力行业的市场结构由发电企业(发电商)、电网公司(购电商)和用户组成,模型见图1。

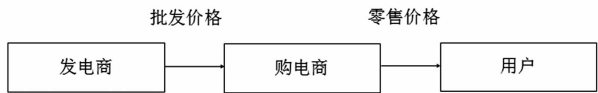


图1 电力行业市场结构

为更好地研究电力供应链中发电商与购电商之间的行为关系,作如下假设。

假设1:购电商的变动成本为 c' (为简化计算,不考虑购电商的固定成本。如果考虑购电商的固定成本,结合后面的前景理论,可以知道对购电商来说,固定成本只是导致购电商的最低收益目标 $U_{\min}^*$ 增大一个固定值),以批发价格 w 从发电商购买电量 q ,以零售价格 p 卖给消费者。市场需求 x 是一个非负的、连续的随机变量,且 $y = x/D$,式中: D 为市场规模系数(反映市场规模大小); $y \in [1 - e, 1 + e]$, e 是市场需求风险(严格地说, y 的标准差为 $e/\sqrt{3}$,以下用市场风险代替), $1 \geq e > 0$,概率密度函数为 $f(y) = 1/2e$ 。用 Π 表示购电商利润, U 表示效用, π 表示期望利润;用上标 r 表示购电商, $*$ 表示购电商的最优策略。电量的销售价格、批发价格和购电商变动成本,有 $p > w > c' > 0$ 。

假设2:基于前景理论的核心思想,设置购电商的参照点处利润为0;人们对损失比对获得更敏感^[15]。当预计未来利润大于0时,购电商是风险规避的;而预计未来利润为0时,购电商是风险中性的;当预计未来利润小于0时,购电商则是风险追求的。图2为购电商的价值 - 利润的关系示意图。

由假设 2 得到购电商的价值函数为

$$U(\Pi)=\begin{cases}\Pi, & \Pi\geqslant 0 \\ \lambda\Pi, & \Pi<0\end{cases}\quad (1)$$

式中, $\lambda(\lambda\geqslant 1)$ 为购电商的风险规避程度。其中: $\lambda=1$ 时表示风险中性购电商; $\lambda>1$ 时表示损失规避型购电商, λ 越大表示购电商越害怕利润损失。

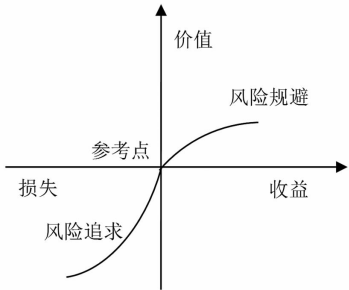


图 2 购电商的价值-利润关系

对购电商来说,存在最低收益 $U_{\min}^r$ 。如果履行合同,购电商从中获取的收益 $E(U^i)$ 至少不低于最低收益 $U_{\min}^r$ 。为简化计算,假设 $U_{\min}^r=0$ 。

2 模型构建

购电量为 q 时,购电商的利润为

$$\Pi^r(q)=\begin{cases} px-(w+c^r)q, & x\leqslant q \\ (p-w-c^r)q, & D(1+e)x>q\end{cases}\quad (2)$$

购电商的盈亏均衡点对应的市场需求为 x^r 。令 $\Pi^r(q)=0$,得到 $x^r=\frac{w+c^r}{p}q$ 。令 $k=\frac{w+c^r}{p}$ 。当 $x\in[0,kq]$ 时, $\Pi^r(q)<0$; $x\in[kq,+\infty]$ 时, $\Pi^r(q)\geqslant 0$ 。

将 $y=\frac{x}{D}$ 和 $f(y)=\frac{1}{2e}$ 代入式(2),得到购电商期望效用为

$$\pi^r(q)=\int_0^{\frac{q}{D}}[px-(w+c^r)q]f(y)\mathrm{d}x+\int_{\frac{q}{D}}^{\frac{D(1+e)q}{D}}(p-w-c^r)qf(y)\mathrm{d}x\quad (3)$$

$$L^r(q)=(\lambda-1)\int_0^{kq}[px-(w+c^r)q]f(y)\mathrm{d}x\quad (4)$$

式中: $\pi^r(q)$ 为购电商在批发价格 w 下购电量为 q 时的期望利润; $L^r(q)$ 为购电商订货量为 q 时的期望效用损失。

购电量为 q 时,购电商的期望效用为

$$E\{U^r[\Pi^r(q)]\}=\pi^r(q)+L^r(q)\quad (5)$$

式(5)说明,损失规避性购电商的期望效用是(风险中性时的)期望利润和损失规避特性带来的期望效用损失的和。购电商的目标是给定批发价格

下,确定最优购电量使其期望效用最大。

式(5)中, $E\{U^r[\Pi^r(q)]\}$ 对 q 求一阶导数和二阶导数,简化得到

$$\frac{\partial E\{U^r[\Pi^r(q)]\}}{\partial q}=(p-w-c^r)\bar{F}\left(\frac{q}{D}\right)-(w+c^r)\cdot\left[F\left(\frac{q}{D}\right)+(\lambda-1)F\left(\frac{kq}{D}\right)\right]\quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 E\{U^r[\Pi^r(q)]\}}{\partial q^2}=-pf\left(\frac{q}{D}\right)-(\lambda-1)\cdot(w+c^r)kf\left(\frac{kq}{D}\right)\quad (7)$$

由式(7)知道, $\frac{\partial^2 E\{U^r[\Pi^r(q)]\}}{\partial q^2}<0$, $E\{U^r[\Pi^r(q)]\}$ 是 q 的凹函数。式(6)中令 $\frac{\partial E\{U^r[\Pi^r(q)]\}}{\partial q}=0$,得到购电商最优购电量 q^* 满足

$$(p-w-c^r)\bar{F}\left(\frac{q^*}{D}\right)-(w+c^r)\cdot\left[F\left(\frac{q^*}{D}\right)+(\lambda-1)F\left(\frac{kq^*}{D}\right)\right]=0\quad (8)$$

由前面市场需求定义和式(8)知道,市场风险 e 和购电商损失规避度 λ 直接影响最优购电量 q^* 。如果令 $\lambda=1$,式(8)化为 $(p-w-c^r)\bar{F}\left(\frac{q^*}{D}\right)-(w+c^r)F\left(\frac{q^*}{D}\right)=0$,这就是风险中性购电商的最优购电量。

3 模型分析

这里分析市场风险 e 、购电商风险规避度 λ 、批发价格 w 、零售价格 p 、购电商成本 c^r 对购电商最优购电量 q^* 的影响。

$$\text{令 } G=(p-w-c^r)\bar{F}\left(\frac{q^*}{D}\right)-(w+c^r)\cdot$$

$$\left[F\left(\frac{q^*}{D}\right)+(\lambda-1)F\left(\frac{kq^*}{D}\right)\right],\text{得到}$$

$$G'_{q^*}=-D\left[\frac{p}{D}f\left(\frac{q^*}{D}\right)+(\lambda-1)(w+c^r)\frac{k}{D}f\left(\frac{kq^*}{D}\right)\right]<0$$

定理 1:购电商最优购电量随市场风险增大而增大。

$$\text{证明:由于 } G'_e=\frac{p}{2e^2}\left(1-\frac{q^*}{D}\right)+(\lambda-1)\frac{w+c^r}{2e^2}\cdot$$

$$\left(1-\frac{kq^*}{D}\right)>0,\text{得到}$$

$$\frac{dq^*}{de} = -\frac{G'_e}{G'_{q^*}} = \frac{1}{e} \cdot \frac{p\left(1 - \frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)(w + c')\left(1 - \frac{kq^*}{D}\right)}{p + (\lambda - 1)(w + c')k} > 0$$

证毕。

市场环境中,如果价格要素不变(零售价格、批发价格、零售商变动成本),定理 1 中简化得到 $\frac{dq^*}{de} = \frac{Z}{e} > 0$,如图 3 所示。

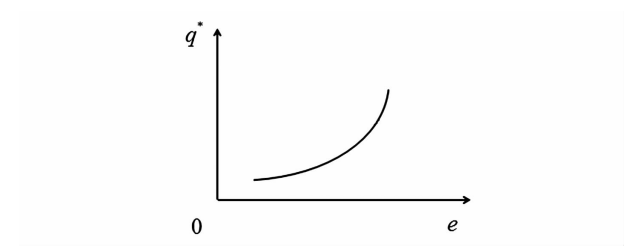


图 3 价格要素不变时,购电商最优订货量与市场风险的关系

定理 2:购电商最优购电量随购电商风险规避度增大而减少。

证明:由于 $G'_{\lambda} = -D(w + c')F\left(\frac{kq^*}{D}\right) < 0$, 因此有 $\frac{dq^*}{d\lambda} = -\frac{G'_{\lambda}}{G'_{q^*}} = -k\frac{kq^* - D(1 - e)}{1 + (\lambda - 1)k^2D} < 0$ 。

证毕。

当 $1 \geq e_1 > e_2 > 0$ 时,对任意的 λ_1 ,定理 2 结合定理 1,有 $q^*(e_1, \lambda_1) > q^*(e_2, \lambda_1)$,如图 4 所示。

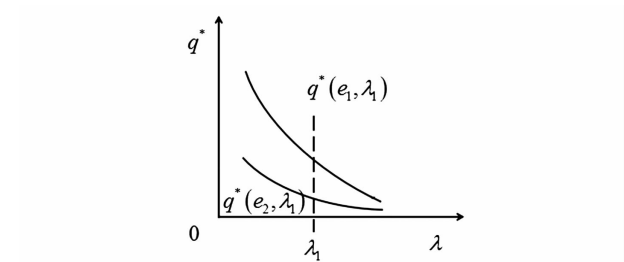


图 4 价格要素不变时,购电商最优订货量与风险规避度的关系

定理 3:购电商最优购电量随批发价格增大而减少。

证明:由 $G'_w = D\left[-1 - (\lambda - 1)F\left(\frac{kq^*}{D}\right) - (\lambda - 1) \cdot \frac{kq^*}{D}f\left(\frac{kq^*}{D}\right)\right]$, 得到 $\frac{dq^*}{dw} = -\frac{G'_w}{G'_{q^*}}$

$$= -\frac{1 + (\lambda - 1)F\left(\frac{kq^*}{D}\right) + (\lambda - 1)\frac{kq^*}{D}f\left(\frac{kq^*}{D}\right)}{\frac{p}{D}f\left(\frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)(w + c')\frac{k}{D}f\left(\frac{kq^*}{D}\right)} < 0$$

化简得到 $\frac{dq^*}{dw} = -\frac{1}{p} \cdot \frac{2De + (\lambda - 1)(2kq^* - D + De)}{1 + (\lambda - 1)k^2} < 0$

证毕。

当 $1 \geq e_1 > e_2 > 0$ 时,对任意的 w_1 ,定理 3 结合定理 1,有 $q^*(e_1, w_1) > q^*(e_2, w_1)$,如图 5 所示。

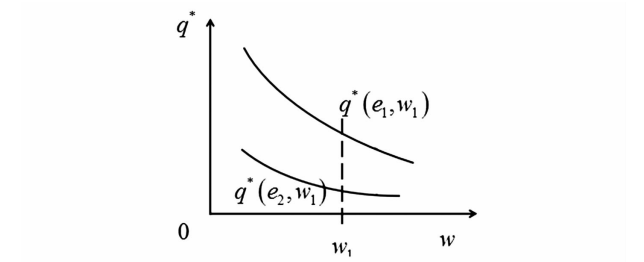


图 5 购电商最优订货量与批发价格的关系

定理 4:购电商最优购电量随零售价格增大而增大。

证明:由 $G'_p = D\left[\bar{F}\left(\frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)k^2f\left(\frac{kq^*}{D}\right)\right]$, 得到

$$\frac{dq^*}{dp} = -\frac{G'_p}{G'_{q^*}} = \frac{\bar{F}\left(\frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)k^2f\left(\frac{kq^*}{D}\right)}{\frac{p}{D}f\left(\frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)(w + c')\frac{k}{D}f\left(\frac{kq^*}{D}\right)} > 0$$

化简得到 $\frac{dq^*}{dp} = \frac{1}{p} \frac{D(1 + e) - q^* + (\lambda - 1)kD^2}{1 + (\lambda - 1)k^2} > 0$

证毕。

当 $1 \geq e_1 > e_2 > 0$ 时,对任意的 p_1 ,定理 4 结合定理 1,有 $q^*(e_1, p_1) > q^*(e_2, p_1)$,如图 6 所示。

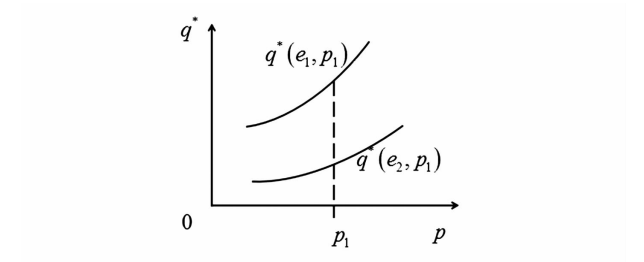


图 6 购电商最优订货量与零售价格的关系

定理 5:购电商最优购电量随购电商变动成本增大而减少。

证明:由于 $G'_{c'} = -D\left[1 + (\lambda - 1)F\left(\frac{kq^*}{D}\right) + (\lambda - 1) \cdot \frac{kq^*}{D}f\left(\frac{kq^*}{D}\right)\right]$

$$\frac{kq^*}{D}f\left(\frac{kq^*}{D}\right)\Bigg],\text{因此有}$$

$$\frac{dq^*}{dc^r} = -\frac{G'_{c^r}}{G'_{q^*}}$$

$$= -\frac{1 + (\lambda - 1)F\left(\frac{kq^*}{D}\right) + (\lambda - 1)\frac{kq^*}{D}f\left(\frac{kq^*}{D}\right)}{\frac{p}{D}f\left(\frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)(w + c^r)\frac{k}{D}f\left(\frac{kq^*}{D}\right)} < 0$$

证毕。

当 $1 \geq e_1 > e_2 > 0$ 时,对任意的 c_1^r ,定理 5 结合定理 1,有 $q^*(e_1, c_1^r) > q^*(e_2, c_1^r)$,如图 7 所示。

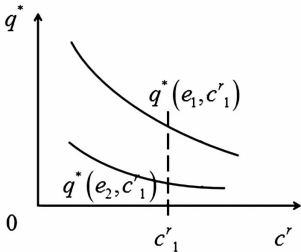


图 7 购电商最优订货量与零售价格的关系

此外,由于 $\frac{dq^*}{dc^r} = \frac{dq^*}{dw}$,说明单位批发价格增加导致的最优购电量减少量与购电商单位变动成本增加是一样的。

4 结 语

在电力行业的市场化运营中,市场需求的不确定性和风险偏好直接影响到购电商的决策。研究基于用电户随机需求构建购电商决策模型,用前景理论刻画购电商的风险规避度,为购电商提供最优决策。结论表明购电商最优购电量随市场风险或零售价格的增大而增大;购电商最优购电量随购电商风险规避度、批发价格或销售变动成本增大而减少。以上结论为电力体制改制背景下的电力企业最优决策提供了理论参考。

参考文献

[1] 万英. 电力供应链管理研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(2): 114 – 117.

[2] 叶春, 冯非. 电力供应链风险的识别与防范[J]. 中国电业, 2006, (11): 54 – 55.

[3] 窦迅, 李扬, 王蓓蓓, 等. 基于整体利润的电力供应链

激励机制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 58 – 62.

[4] 张少华, 方勇, 李渝曾. 一种激励相容的发电市场竞争价机制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 27 – 31.

[5] 张少华, 方勇, 李渝曾. 电力市场中的激励性机制设计[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 52 – 56.

[6] 谢俊, 陈星莺. 激励相容的输配分开电力市场竞争价机制初探[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 60 – 64.

[7] 窦迅, 李扬, 王蓓蓓, 等. 电力供应链的收益风险研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 11 – 15.

[8] 方勇, 张少华, 李渝曾. 一种激励相容的电力市场可中断负荷管理合同模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 23 – 26.

[9] 方勇, 李渝曾. 电力市场中激励性可中断负荷合同的建模与实施研究[J]. 电网技术, 2004, 28(17): 41 – 46.

[10] 杨强, 蔡华祥, 严明辉, 等. 基于激励相容与深度博弈的云南电力市场机制设计及应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 27 – 34.

[11] 周明, 聂艳丽, 李庚银, 等. 电力市场下长期购电方案及风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 118 – 124.

[12] 王绵斌, 谭忠富, 曹福成, 等. 输配分开环境下供电公司购电风险的优化控制模型[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 184 – 190.

[13] 张钦, 王锡凡, 王建学. 需求侧实时电价下供电商购售电风险决策[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 22 – 27.

[14] 郭兴磊, 张宗益, 亢娅丽, 等. 基于 CVaR 模型的大用户直购电决策分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 32 – 37.

[15] Kahneman D, Tversky A. Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk[J]. Econometrica, 1979, 47(2): 263 – 291.

[16] Wang C, Webster S. The Loss – averse Newsvendor Problem[J]. Omega, 2009, 37(1): 93 – 105.

[17] 潘俊涛, 彭建春, 孙芊, 等. 基于前景理论的发电商电量分配策略[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 170 – 175.

[18] 吴杨, 杨超, 赵志强. 基于前景理论的混合发电权交易匹配模型[J]. 系统工程, 2017(11): 58 – 67.

作者简介:

严 磊(1983), 工程硕士、工程师, 研究方向为科技情报咨询、科技管理、技术标准管理。

(收稿日期: 2018 – 11 – 01)

基于热通道模型的电能表外置断路器温升研究

梁捷
(广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西南宁 530023)

摘要:为评估电能表外置断路器各部位热点的温升情况,研究了外置断路器处于稳态载荷时由内部热源向外的传热过程;然后基于热电比拟理论建立了断路器稳态热通道温升计算模型,给出了传热过程各环节的传导、对流和辐射热流量以及热阻的计算公式;最后通过建模仿真比较了不同负荷电流下所提方法与有限元模型对断路器内部导体热点温升的计算结果,验证了所提模型的有效性。

关键词:电能表用外置断路器;温升;热通道模型;热电比拟理论

中图分类号:TM561 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)06-0052-04

Research on Temperature Rise of External Circuit – breaker for Electricity Meter Based on Heat Channel Model

Liang Jie
(Electric Power Research Institute, Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530023, Guangxi, China)

Abstract:In order to improve the accuracy of temperature rise monitoring for hot spot of external circuit – breaker for electricity meter, firstly, the heat transfer process of external circuit – breaker from the inside to the outside under steady – state load is analyzed. And then the steady – state thermal channel temperature calculation model for circuit breaker is established based on thermoelectricity analogy theory. The aspects of heat transfer conduction, convection and the radiation heat flux are given as well as thermal resistance formula. Finally, under different load current, the calculation results of the proposed method and the finite element model are compared through modeling and simulation for the the hot spot temperature rise of internal conductor of circuit breaker, which verifies the validity of the proposed model.

Key words:external circuit – breaker for electricity meter; temperature rise; heat channel model; thermoelectric analogy theory

0 引言

随着南方电网费控电能表和远程售电系统的建设应用,电能表用外置断路器(external circuit – breaker for electricity meter,以下简称EM断路器)成为实现远程拉合闸功能的重要设备^[1]。研究影响其负载能力的脱扣器触头热点温升计算方法,可为EM断路器的负载能力和动态增容评估、避免过热失效提供技术基础^[2]。EM断路器常见热点测温法包括直接法和间接算法。直接法测量时需要先将EM断路器封闭式绝缘外壳破坏,露出其中的脱扣器触头,再通过传感器探头接触式测温^[3],该方法测量准确但破坏设备绝缘后设备无法再使用。间接算法是通过电流、表面温升等易于测量的量间接

推算EM断路器的内部热点温升^[4]。间接算法不需破坏绝缘,故在设备状态评估方面具有较强实用性。

常见断路器的温升间接算法包括有限元法^[5]和热通道法^[6]。有限元法需建立设备及其运行环境的准确模型,模拟EM断路器的工况,该法准确度较高,但设备结构复杂时建模工作量大且计算速度较慢,适用于产品设计和理论分析阶段。等效热通道模型法将设备自身与周围环境的热传递过程等效为一个分布参数热通道模型,易于实现。

下面在分析EM断路器传热过程的基础上,建立在不同负荷电流下的基于等效热通道的稳态热点计算模型,并通过案例与有限元法进行比对,验证所提方法的有效性。

1 传热流程的理论分析

EM 断路器通常与电能表安装在同一表箱内, 可通过电能表发出的开关控制信号控制其分、合闸, 相对于传统微型空气开关, 它不仅有简单的过流保护功能, 还增加了欠费分闸、分合闸状态反馈等费控辅助功能。它的主要结构包括外壳、操作机构、动静触头、脱扣器等, 某型号单相电能表用外置断路器如图 1 所示。



图 1 某电能表用外置断路器

1.1 传热流程分析

EM 断路器产生的热量主要源于其内部脱扣器和触头等导体的通电热效应, 并通过热的 3 种传递方式由自身传导到周围空气中。其传热过程如图 2 所示。当 EM 断路器有负荷电流流过时, 由焦耳定律可知, EM 断路器的火线(L)和零线(N)回路的电能功耗转化为热能。热能经导体、内部气隙与外壳间的热对流以及导体与外壳间的热辐射, 被传到外壳金属部分的内壁上。外壳内壁的累积热量通过热传导传递至外壳表面, 最后经由外壳与周围空气间的热辐射和热对流, 把热量传到周围的空气中。当负载电流、空气温度等条件不发生变化, 热量的产生和耗散相等时, 温度场达到平衡。

1.2 热电比拟理论

热量传递可描述为能量由高温体传递至低温体的过程。与电学的欧姆定理相似, 由傅里叶导热定律, 传导的热量可用温度的比例关系定量描述为^[7]

$$Q = A \frac{\lambda}{\delta} \Delta T = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (1)$$

式中: Q 为传递的热量, W; λ 为导热系数, W/m²; δ

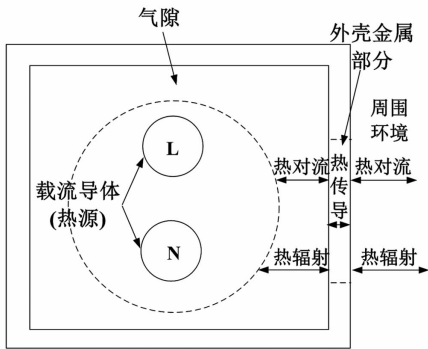


图 2 EM 断路器热量传递流程

为载流导体的厚度, m; R_T 为热阻系数, m² · K/W; ΔT 为热传递双方的温差, K。热通道中热量传递与电路中电流回路类似, 热量传递时的等值热通道模型遵守类似于电路中的基尔霍夫定律。计算时首先由热电比拟理论按各传热环节的热传递方式, 求取热传导、热辐射、热对应对应的热导系数等参数, 建立基于热通道的热点温度计算模型, 再将热源热量代入该模型求解出断路器内部热点温度。

2 计算方法

2.1 稳态热通道模型

由图 2 的热量传递流程, 根据热电比拟理论可建立 EM 断路器稳态热通道模型如图 3 所示。

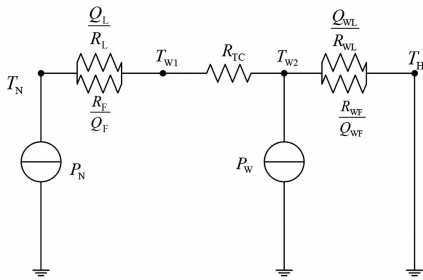


图 3 EM 断路器稳态热通道模型

图 3 中: P_N 为 EM 断路器内部导体的稳态载流功耗; P_W 为外壳功耗; T_N 为内部导体的热点温度; T_{W1} 和 T_{W2} 分别为 EM 断路器外壳内外金属壁温度; T_H 为周围的环境温度; Q_L 和 Q_F 分别为内部导体与外壳间气隙的对流和辐射传递热量; R_L 和 R_F 分别为对应的对流热阻和辐射热阻, 由于这段较小的距离内两者同时存在, 故以并联关系表示; R_{TC} 为热量从外壳内表面传到外表面的传导热阻; R_{WL} 和 R_{WF} 分别为外壳与周围空气间的对流热阻和辐射热阻; Q_{WL} 和 Q_{WF} 分别为外壳与周围空气间的对流和辐射传递热

量。由此可见,若要求得 EM 断路器内导体的热点温升,须先求出载流导体的功耗和各个热传递环节的热阻等建模参数。

2.2 EM 断路器导体功耗

由热力学第一定律,EM 断路器的载流导体功耗可在导体建立能量守恒方程计算,方法可参考文献[8]。

2.3 导体与外壳间换热

EM 断路器的内部金属触点等导体与外壳间热量传递的主要形式为内部气隙层的对流和辐射热量传递。

1) 对流热量传递

EM 断路器内部载流导体发出的热量通过内部气隙向外壳通过对流方式传导的热量^[9]

$$Q_L = \alpha A_0 (T_N - T_f)$$

(2)

式中: Q_L 为热对流的传热量; α 为对流换热系数; A_0 为对流散热面积; T_N 为热源温度; T_f 为内部气隙温度,近似等于外壳内表面温度。则对流热传递的热阻 R_L 可通过所传递的对流热量和内部导体与外壳金属部分内表面之间的温差表示:

$$R_L = \frac{T_N - T_f}{Q_L}$$

(3)

2) 辐射换热量

对电能表用外置断路器,内部热源对外壳的热辐射主要与内部载流导体的位置、导体和外壳的尺寸有关,则热辐射传递的热量为

$$Q_F = 5.7\varepsilon [(\frac{T_N}{1000})^4 - (\frac{T_f}{1000})^4]$$

(4)

式中: Q_F 为热辐射的传热量; ε 为辐射系数。则内部导体与外壳间的辐射热阻 R_F 为

$$R_F = \frac{T_N - T_f}{Q_F}$$

(5)

2.4 外壳传导热量

EM 断路器外壳导体大多为规则立方体,多选导热性良好的铝为材料,为便于计算,假设整个立方

体壁面的稳态热流量为恒定值,由傅里叶热传导基本方程可知,在单位长度上的热流密度为

$$q_c = -\lambda_l \frac{dT}{dX}$$

(6)

式中: q_c 为单位长度上的热流密度; λ_l 为外壳金属材质的导热系数; dT/dX 为单位长度上的温度微变量。则通过外壳导体的热流量 Q_c 为

$$Q_c = Vq_c$$

(7)

式中, V 为外壳金属部分的体积。则外壳热传导的热阻 R_{TC} 为

$$R_{TC} = \frac{T_{W1} - T_{W2}}{Q_c}$$

(8)

2.5 外壳与空气间换热

EM 断路器的外壳直接与周围环境的空气接触,其金属部分具有较好的传热性能,类似内部热源通过气隙与外壳内壁的热交换过程,外壳收到从内部传来的热量后主要通过对流和辐射的方式将热量传导至周围空气中,计算方法可参考第 2.3 节。

3 算例仿真和分析

3.1 计算过程

对前面节所述的 3 个热传递过程,根据热电比拟理论和历史热点测量数据通过 Matlab 建模逐过程计算内部导体温升及外壳内外温升。以外壳外表面热点温度为例,其计算流程见图 4。

3.2 算例分析

为测试所提温升计算方法的准确性,以某级数为 2P 的单相 EM 断路器为模型,分别建立所提热通道和有限元^[5](finite element mode, FEM)数值计算模型,断路器内部导体直径、厚度分别为 56 mm、10 mm;外壳宽度、厚度分别为 89 mm、45 mm;额定电流是 80 A;环境起始温度是 28 ℃,周期空气流速恒为平行于外壳 1.8 m/s;外壳金属部分的电阻率为



图 4 EM 断路器外壳外表面温升计算过程

$2.9 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 内部导体电阻率为 $2.6 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$, 脱扣器触头电阻取 $30 \mu\Omega$; 考虑到单相电子式费控电能表的有效电流测量范围为 $5 \sim 80 \text{ A}$, 对 EM 断路器电流回路逐点施加 5 A 、 15 A 、 35 A 、 55 A 、 75 A 、 80 A 电流, 计算在不同负载电流时 EM 断路器内部触点导体与外壳金属部分的热点温度。FEM 与所提热通道模型计算结果如图 5。

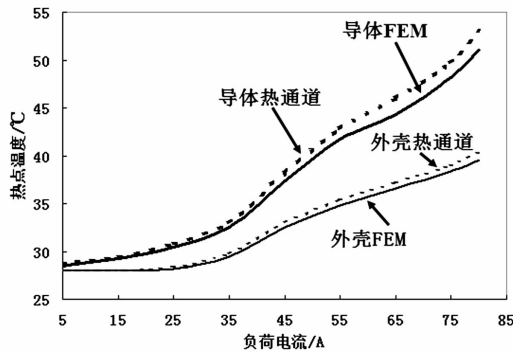


图5 不同负载电流时热点温度计算结果

由图 5 可见, EM 断路器内部触点导体与外壳金属部分的热点温度随负载电流的增大而增大, 由于导体为热源, 其热点温度均高于外壳。负荷电流小于 10 A 时, 外壳与触头的温升变化不明显, 随负荷电流增大, 触头与外壳热点的温升逐渐增高, 且增幅逐渐加大。在负荷电流为 80 A 时: FEM 模型求得的导体热点温升是 23.0°C , 外壳温升是 11.6°C , 计算时间为 20.5 s ; 所提热通道法求得的导体热点温升是 25.0°C , 外壳热点温升是 12.3°C , 计算时间为 17.1 s , 最大温升均满足技术规范要求^[10]。所提方法与 FEM 法相比的误差较小, 不超过 8.6% , 计算速度比 FEM 法稍快。

4 结 语

在分析电能表用外置断路器通以恒定电流时由内向外的热传导过程的基础上, 基于热电比拟理论建立了 EM 断路器的热通道热点温升计算模型。通过建模仿真比较了在不同的负荷电流下, 所提热通道法和有限元法对内部导体和外壳热点温升计算的结果可知, 由于所提模型在计算模型参数时对传热

学公式做了近似处理, 故求得的温升误差相比于有限元法略大, 但最大误差不超过 8.6% , 且计算速度稍快。如何提高其计算准确度, 使计算结果满足断路器状态监测和负载能力评估的应用需求, 值得进一步研究。

参考文献

- [1] 张培, 姜家寅. 电能表外置断路器的应用[J]. 农村电工, 2017(3): 51-51.
- [2] 李兴文, 王云峰, 原帅, 等. 微型断路器短路开断过程中电极烧蚀特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1080-1087.
- [3] 王静, 胡景泰, 胡应龙, 等. 断路器接线端子温度监测技术[J]. 电器与能效管理技术, 2013(15): 11-14.
- [4] 宗兆科, 史华宁. 高海拔环境对万能式断路器温升影响的研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(11): 19-22.
- [5] 纽春萍, 董得龙, 孙昊, 等. 万能式断路器短时耐受电流的有限元分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 85-90.
- [6] 孙凯祺, 刘浩, 傅晨钊, 等. 220 kV 瓷柱式断路器修正热路模型研究[J]. 华东电力, 2013, 41(6): 1215-1219.
- [7] 刘梦佳, 孙逢瑞, 刘莉, 等. 基于稳态 Fourier 定律的过热蒸汽吞吐焖井时间计算方法[J]. 石油化工应用, 2016, 35(11): 25-28.
- [8] 戴水东, 鞠文哲, 夏克文, 等. 采用 PSO 算法对低压断路器的低能耗优化设计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 100-106.
- [9] 朱琳, 王励, 石伟. 机车车轮对流传热系数计算[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(1): 21-24.
- [10] 电能表外置断路器技术规范: Q/GDW 11421-2015 [S], 2016.

作者简介:

梁 捷(1987), 工学硕士、工程师, 主要从事电能计量管理方面的工作。

(收稿日期: 2018-06-26)

新能源物流车充电站设施选址评价模型研究

周鹏程, 吴南南, 曾 鸣

(华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206)

摘 要:随着新能源物流车广泛地用于城市物流配送领域,提出了一种针对电动汽车充电站选址的评价模型。首先综合考虑经济、社会、技术等因素,构建了不同类别的充电站设施选址的评价指标体系。其次,通过定性与定量相结合的分析,建立了基于组合赋权法的设施选址评价模型。在此基础上,通过某物流企业的备选充电站址的相关数据进行算例验证,并对各备选方案进行了对比分析。结果证明了所提方法的有效性,为物流企业科学、合理地进行充电站选址提供了决策支撑。

关键词:电动物流车;充电站选址;评价指标体系;组合赋权;对比分析

中图分类号:U469.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)06-0056-04

Research on Evaluation Model for Location Selection of Electric Logistics Vehicle Charging Station

Zhou Pengcheng, Wu Nannan, Zeng Ming

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: As the new energy logistics vehicles are widely used in the urban logistics and distribution field, an evaluation model for location selection of electric vehicle charging stations is proposed. First of all, considering economics, society and other factors, the evaluation index system for location selection of different types of charging station facilities is constructed. Secondly, through the combined qualitative and quantitative analysis, an evaluation model for location selection of facilities based on combination weighting method is established. On this basis, an example is verified by the relevant data of an alternative charging station of a logistics enterprise, and comparative analysis of each alternative is carried out. The results prove the effectiveness of the proposed method, which provides a decision support for the scientific and reasonable location of charging station.

Key words: electric logistics vehicle; location selection of charging station; evaluation index system; combination weight method; comparative analysis

0 引 言

近年来,中国多个城市陷入“雾霾危机”。汽柴油燃烧产生的尾气已成为城市占比最高的污染源,尤其是货运业的原油消费量惊人,发展新能源货运势在必行。在“2016 年全国货运行业年会”上,众多专家讨论了物流电动化的发展现状及趋势。随着环境污染加剧和电商快递业务转型升级,新能源物流车(electric logistics vehicle,ELV)逐渐成为物流公司的首选^[1-2]。科学合理的充电站选址对于ELV能

否满足客户个性化配送服务来说至关重要,对物流企业降低运输成本、提高规模效益具有现实意义。

国内外针对电动汽车充电站设施选址研究的文献较多,主要集中于对选址评价、布局规划、定容优化策略等方面。文献[3]建立了基于空间聚类和多层次模糊评估的电动汽车充电站选址模型。文献[4]研究了直觉模糊环境下社区电动汽车充电站选址决策优化。文献[5-6]分别考虑削峰填谷和计及碳排放,构建了电动汽车充电站多目标选址定容规划模型。此外,文献[7-8]提出基于云重心理论的电动汽车充电站选址规划评估方法,将定量和定性指标进行处理并建立了云模型。上述研究虽对电动汽车充电站构建了不同的选址模型,但未涉及具

基金项目:国家自然科学基金(51507061);国家电网公司科技项目(SGEPRI-KJB-KJ(2017)2766);国家电网公司科技项目(NY71-18-004)

体应用场景研究,前期也缺少对充电站选址合理性的综合评价分析。

鉴于此,在前人工作的基础上开展了将电动汽车充电站选址问题应用于 ELV 的研究。首先,考虑经济、社会等因素,构建了充电站设施选址的评价指标体系。其次,通过定性与定量相结合的分析,建立了基于层次分析法 (analytics hierarchy process, AHP)、熵值法、最小二乘法组合赋权的 ELV 充电站选址评价模型。最后,通过某物流企业的备选充电站址的相关数据进行了算例验证,对各备选方案进行了对比分析。

1 构建评价指标体系

1.1 指标选取思路

针对 ELV 充电站设施选址研究,在保证物流车自身充电需量的前提下,满足客户个性化配送服务的需求。充电站在选址时需要考虑经济、社会等因素的影响,具体解释如下。

1)经济因素。该因素是指充电站建设总费用和投资回收期,包括土地投入、工程建设、运行维护等成本。选取建设运维成本 A_{11} 、投资回收期 A_{12} 作为经济因素的评价指标。

2)社会因素。对 ELV 充电站选址产生影响的普遍因素,主要包括土地资源利用 A_{21} 、交通便利度 A_{22} 、服务半径和能力 A_{23} 。

3)技术因素。主要考虑电能质量和用电量是否能够满足 ELV 的充电需求,设备利用率是否能降低车辆充电时间成本。选取电能质量和用电量 A_{31} 、充电站设备利用率 A_{32} 作为技术因素的评价指标。

4)规划因素。充电站选址的定容规划会受到路网、电网和城市整体规划等限制,选取与城市规划协调性 A_{41} 作为规划因素的评价指标。

1.2 指标体系设计

综合考虑上述影响因素,从中选取了 8 项指标构建了充电站选址评价指标体系,如表 1 所示。

2 基于组合赋权法的电站选址评价模型

通过定性与定量相结合的分析,综合 AHP 法、熵值法、最小二乘法进行权重组合优化,建立 ELV

充电站选址评价模型。

表 1 充电站选址最优决策 A 评价指标体系

一级指标	二级指标
经济因素 A_1	建设与运维成本 A_{11}
	投资回收期 A_{12}
社会因素 A_2	土地资源利用 A_{21}
	交通便利度 A_{22}
	服务半径和能力 A_{23}
技术因素 A_3	电能质量和用电量 A_{31}
	充电站设备利用率 A_{32}
规划因素 A_4	与城市规划协调性 A_{41}

2.1 AHP 法

AHP 法是一种将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次权重决策的分析方法,既包含了专家对指标重要性的主观判断,又遵循了指标间的客观关系^[9]。具体步骤如下:

1)在考虑上、下层逻辑关系的基础上,将每一个上层元素与下层元素之间进行两两判断,并构造出判断矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times m}$ 。

2)针对判断矩阵中的元素进行归一化处理,计算判断矩阵的特征值 $\lambda_{ij} = \sum_{i=1}^m (\bar{B}\bar{\psi})_i / n\bar{\psi}_i$ 与特征向量 $\bar{\psi}_i = \psi_i / \sum_{i=1}^m \psi_i$,其中 $i = 1, 2, \cdots, n$ 。

(3)检验判断矩阵的随机一致性比例 R_C 是否满足 $R_C < 0.1$,若满足则通过一致性检验。 $R_C = I_C / I_R$,且 $I_C = (\lambda_{ij} - n) / (n - 1)$,其中, I_C 为一致性检验指标, I_R 为平均随机一致性指标, n 为判断矩阵的阶数。

4)利用同一层次单排序的结果,从上到下逐层进行排序。

2.2 熵值法

熵值法是根据各指标传输给决策者的信息量大小来确定权重的方法。如果评价指标的信息熵越小,则该指标提供的信息量越大,权重应该越高。具体步骤如下:

1)假设 m 为评价指标个数, n 表示备选站址数量, x_{ij} 是样本 $i (i \leq n)$ 相对于评价属性 $j (j \leq m)$ 的预设值,指标数据矩阵为 $X = (x_{ij})_{n \times m}$ 。

2)令 $\bar{x}_j$ 为各评价指标的最优值,其中若 j 为正指标,则 $\bar{x}_j$ 越大越好;若 j 为负指标表示越小越好。 x_{ij} 相对于 $\bar{x}$ 的接近度用矩阵 D_{ij} 表示,并对其进行归一化处理,得 $d = (d_{ij})_{n \times m}$ 。

3)分别求解 m 个评价指标的条件熵 E_j ,并对其

进行归一化处理,得到关于各评价指标重要性的熵值 $e(d_j) = (1/\ln n) E_j$ 。

(4) 分别确定 m 个评价指标的权重值 $\lambda_{2j} = (1/n - E_e) [1 - e(d_j)]$, 其中 $0 \leq \lambda_{2j} \leq 1, \sum_{j=1}^m \lambda_{2j} = 1$, 且 $E_e = \sum_{i=1}^n e(d_j)$ 。

2.3 最小二乘法

考虑到上述主观与客观赋权下的指标权值偏差越小越好,采用最小二乘法对权重进行综合优化,构成组合赋权模型。

$$\min Z(\omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{ [(\lambda_{1j} - \omega_j) d_{ij}]^2 + [(\lambda_{2j} - \omega_j) d_{ij}]^2 \}$$

(1)

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^m \omega_j = 1, \omega_j \geq 0$$

(2)

式中: $Z(\omega)$ 为主客观权重偏差; ω_j 为最小二乘法综合优化后的组合权重。

2.4 求解流程

基于已建立的 ELV 充电站选址评价模型,对评价指标进行确定和量化分析。具体求解流程基于地市级进行配网投入产出综合评价,并进行效益对比分析:

1) 为便于比较,消除指标间的单位和量级差异的影响,对指标矩阵进行规范化处理。

2) 进行组合赋权。通过 AHP 法和熵值法分别计算评价指标权值,采用最小二乘法进行综合优化得出组合权重。

3) 确定指标的隶属度函数类型。参数间的函数关系可采用二次函数、指数函数以及对数函数等形式拟合分析。其中,三次函数的拟合程度最高,二次与三次函数的拟合程度相近。考虑到 ELV 充电站选址的评分关系的复杂性,采用二次函数 $y = a_1x^2 + a_2x + a_3$ 作为备选方案与评价指标的评分函数。其中, y 为评价得分, x 为评价指标值, a_2 、 a_1 分别为一、二次项系数, a_3 为随机误差项。

4) 计算备选方案评价得分。根据评分函数对各备选方案指标进行打分,并加权求出每层指标得分。按照评价指标组合权重得出城区内各备选站址的整体得分。

3 算例分析

3.1 基础数据

为验证所提模型的实用性,选取某市物流企业拟选 ELV 充电站址作为研究对象,对备选方案的实际指标数据进行综合评价。基础数据如表 2 所示。

表 2 拟选方案评价指标基础数据

评价属性	评价指标	方案 A	方案 B	方案 C
经济因素	工程总成本/万元	592	434	537
	投资回收期/a	6.7	5.7	7.3
社会因素	土地资源利用/%	58.7	56.4	63.2
	交通便利度/%	89.0	89.9	86.9
	物流服务效益/%	98.2	96.1	95.7
技术因素	年用电量/(MW·h)	2 423.6	2 937.1	2 697.4
	设备利用率/%	63.3	65.9	69.4
规划因素	规划协调性/%	73.6	70.6	72.1

3.2 算例求解与结果分析

基于建立的充电站选址评价指标体系,通过综合赋权法计算权重系数,权值结果如表 3 所示。

表 3 评价指标组合权重计算结果

评价指标	AHP 法权重	熵值法权重	组合权重
A_{11}	0.134	0.160	0.143
A_{12}	0.156	0.108	0.134
A_{21}	0.056	0.081	0.068
A_{22}	0.167	0.107	0.136
A_{23}	0.141	0.161	0.153
A_{31}	0.101	0.128	0.118
A_{32}	0.092	0.133	0.114
A_{41}	0.153	0.122	0.134

由表 3 可知,交通便利度、服务半径和能力、电能质量和用电量这 3 个指标的权重较大,土地资源利用所占权重最小,这与物流企业配送中心选址和 ELV 充电站选址所考虑的实际原则相一致。

对基础数据进行无量纲化处理,基于组合权重计算结果,求得各评价指标值。根据确定评分函数曲线 $y = a_1x^2 + a_2x + a_3$ 的系数,计算充电站选址评价指标得分,计算结果如表 4 所示。

为分析比较各备选方案指标间的差异,采用雷达图对备选方案评价得分进行进一步说明,如图 1 所示。

显然,方案 C 的整体评价较为均衡,但各项指标得分普遍较低。方案 A 的物流服务半径和能力、与城市规划协调性两项指标得分值相对较高,表明

表 4 充电站选址评价指标得分 ($a_1 \approx 76$; $a_2 \approx 36$; $a_3 \approx 69$)

一级指标	二级指标	方案 A		方案 B		方案 C	
		指标值	得分	指标值	得分	指标值	得分
A_1	A_{11}	0.106 4	73.4	0.117 8	74.3	0.109 3	73.8
	A_{12}	0.104 1	73.6	0.106 4	74.3	0.102 2	73.5
A_2	A_{21}	0.052 2	71.5	0.051 1	71.2	0.053 3	71.8
	A_{22}	0.112 4	73.7	0.113 2	74.3	0.109 1	73.3
	A_{23}	0.127 9	75.5	0.125 5	74.7	0.121 4	73.5
A_3	A_{31}	0.092 4	73.0	0.095 9	73.6	0.094 2	73.1
	A_{32}	0.085 8	72.6	0.087 7	73.1	0.089 0	73.5
A_4	A_{41}	0.108 4	75.2	0.103 7	74.0	0.106 7	73.4

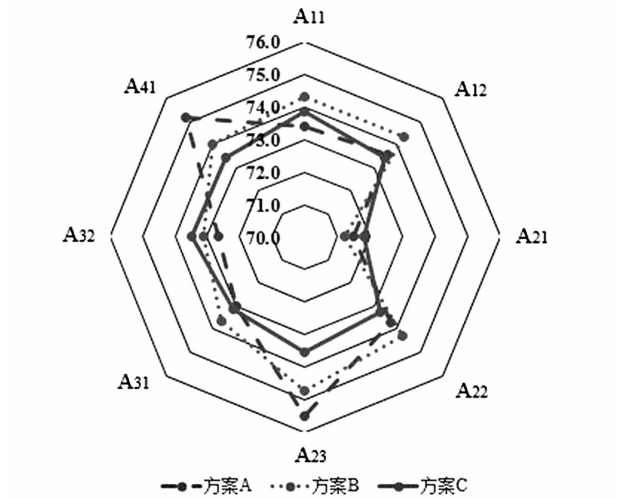


图 1 备选方案评价得分

该方案将有效迎合城市规划和满足客户服务需求，但建设成本较大。方案 B 虽在土地资源利用方面得分最低,但该方案建设成本少、投资回收期短、交通便利且年用电量最高,这说明方案 B 更能满足企业利益需求。

4 结 语

针对 ELV 充电站设施选址评价问题,提出了一种基于组合赋权法的充电站选址评价模型。在充分考虑经济、社会等 4 个因素的基础上,从中选取了建设与运维成本、交通便利度等 8 项指标构建了评价指标体系。通过算例实证发现,科学合理的 ELV 充电站选址评价研究可以降低企业的建设成本,有效满足客户配送服务需求和城市规划布局要求。算例结果验证了所提出方法的有效性,为物流企业更好地进行 ELV 充电站选址评价提供了决策支撑。

参考文献

[1] 刘慧,陶君成,潘林. 纯电动物流车规模商业化机遇、

挑战及策略[J]. 商业经济研究, 2017(8): 79 – 80.

[2] 李英,李惠. 基于价值网络的电动物流车商业模式创新研究[J]. 科技管理研究, 2017, 37(4): 219 – 225.

[3] Meng W. Location of Electric Vehicle Charging Station Based on Spatial Clustering and Multi – hierarchical Fuzzy Evaluation [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 34(1): 89 – 96.

[4] Yunna W, Chao X, Chuanbo X, et al. A Decision Framework for Electric Vehicle Charging Station Site Selection for Residential Communities under AN Intuitionistic Fuzzy Environment;A Case of Beijing [J]. Energies, 2017, 10(9):1270.

[5] 所丽,唐巍,白牧可,等. 考虑削峰填谷的配电网集中型充电站选址定容规划[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1052 – 1060.

[6] 陈光,毛召磊,李济沅,等. 计及碳排放的电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17):49 – 53.

[7] 彭泽君,兰剑,陈艳,等. 基于云重心理论的电动汽车充电站选址方法[J]. 电力建设, 2015, 36(4):1 – 7.

[8] 吴翠玉,张美霞,陈海燕,等. 电动汽车充电站规划研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(11): 31 – 37.

[9] 周鹏程,吴南南,曾鸣. 考虑投入产出关联关系的配网效益评价研究[J]. 山东电力技术, 2017, 44(12): 1 – 5.

作者简介:

周鹏程(1991),硕士研究生,主要研究综合能源系统、能源互联网;

吴南南(1994),硕士研究生,主要研究电动汽车规划、电力经济技术管理;

曾 鸣(1957),教授、博士生导师,主要研究能源互联网、综合能源系统。

(收稿日期:208 – 07 – 25)

基于改进 DE 的含风电机组配电网多目标无功优化

冯 肯¹,杨 迪²,肖 汉¹,李嘉逸¹

(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技能培训中心,四川 成都 610072)

摘 要:电网无功优化是保障电网安全、经济、可靠运行的基本手段,普遍方法是应用智能优化算法以确定电网无功设备投切方案,为此引入差分进化算法解决含风电机组的配电网无功优化问题。考虑风电机组出力的随机性,采用基于场景概率方法,建立了全场景下计及有功网损、静态电压稳定指标、无功补偿设备投资成本的多目标无功优化模型。针对基本差分进化算法的不足,结合免疫原理和二次变异思想改进了差分算法,改进后算法在充分利用进化过程中优良信息的同时,又能保持种群多样性。算例分析结果验证了所建模型与改进方法的可行性和有效性。

关键词:风电机组;无功优化;差分进化算法;免疫原理;二次变异

中图分类号:TM714 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)06-0060-06

Multi-objective Reactive Power Optimization for Distribution Network with Wind Power Generators Based on Improved Differential Evolution

Feng Ken¹, Yang Di², Xiao Han¹, Li Jiayi¹

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Technical Training Center, Chengdu 610072, Sichuan, China)

Abstract: Reactive power optimization is the basic means to ensure the safety, economic and reliable operation of power grid. The general method is to apply intelligent optimization algorithm to determine the reactive power equipment switching scheme. Therefore, differential evolution algorithm is introduced to study the reactive power optimization of distribution network with wind power generators. In order to consider the randomness of wind power generators, a multi-objective reactive power optimization model that is based on scenario analysis is established in the all scene. This model is composed of active network loss, static voltage stability and investment cost of reactive compensation. Aiming to overcome the drawbacks of traditional differential evolution algorithm, an improved algorithm is proposed, which utilizes the excellent information of the group in evolutionary learning process and simultaneously maintains the population's diversity. The case analysis shows the feasibility and effectiveness of the model and the improved algorithm.

Key words: wind power generator; reactive power optimization; differential evolution algorithm; immune principle; second mutation

0 引 言

配电网无功优化既是保障电网安全、经济、可靠运行的基本手段,也是提高系统电压水平的重要方式^[1]。随着风力、光伏、燃料电池等分布式发电技术不断进步,在优化能源供给结构的同时,也改善了环境问题。但分布式电源的并网会对配电网系统产

生重要影响^[2-4],与此同时,分布式电源出力的不确定性,如风机出力随风速变化、光伏发电随光照强度变化等,使得传统配电网无功优化方法难以适应这些复杂变化情况。

目前,含风电机组的配电网无功优化已引起广大学者的重视。文献[5]建立了以有功能耗为目标的单目标优化模型,在不同风机出力下应用遗传算法确定各状态下 SVC 补偿容量。文献[6]考虑了有

功网损和电压稳定裕度指标,提出了一种基于场景发生概率的无功优化指标。文献[7]建立了成本效益比、静态电压稳定指标模型,采用多场景分析风机出力,并应用粒子群算法求解。文献[8]采用多目标的遗传算法求解在电力系统最大负荷运行方式下多目标无功优化问题。

在无功优化方法上,为解决电力系统无功优化中多约束与多变量、连续与离散变量共存等问题,众多学者对此展开了大量研究。近年来,如遗传^[9]、免疫^[10]、差分进化^[11-12]、粒子群^[13]等人工智能优化算法被大量用于求解无功优化问题,取得了许多成果。其中的差分进化算法(differential evolution, DE 算法)是 R. Storn 和 K. V. Price 在 1995 年提出的一种进化算法^[14],该算法在收敛性和鲁棒性方面均表现良好,适宜解决电力系统的各种优化问题。但是传统 DE 算法也存在盲目选择控制参数,且易陷入局部最优等不足。

因此,在对含风电机组的配电网进行无功优化时,应充分考虑其出力的不确定性、连续与离散变量之间的关系。为此,首先基于场景概率的理论建立了全场景下计及有功网损、静态电压稳定性、无功补偿设备投资成本的多目标无功优化模型;然后针对基本差分进化算法的不足对其进行了一定的改进;最后将改进后的算法用于求解含风电机组的配电网多目标无功优化问题。

1 基于场景概率的风电机组有功出力

风机的有功出力与风速大小息息相关,随风速变化,可分为停机、欠额定、额定 3 种运行状态。图 1 为风电机组功率特性曲线,其中 v_{li} 、 v_{lr} 、 v_{lo} 分别为风机切入、额定和切出风速, P_r 为风机额定输出功率。

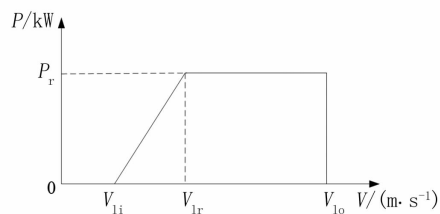


图 1 风电机组功率特性曲线

一般情况下,普遍认为风速服从二参数的威布尔分布,其概率密度函数为^[15]

$$f_v(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

式中: v 为风速; c 为尺度参数,表示某地的平均风

速; k 为形状参数,表示风速的分布特征。

根据风速概率密度函数,可由式(2)至式(4)计算风机 3 种运行状态发生的概率。

$$h_1 = \int_{v_{lr}}^{v_{lo}} f_v(v) dv \quad (2)$$

$$h_2 = \int_{v_{li}}^{v_{lr}} f_v(v) dv \quad (3)$$

$$h_3 = 1 - \int_{v_{lr}}^{v_{lo}} f_v(v) dv - \int_{v_{li}}^{v_{lr}} f_v(v) dv \quad (4)$$

式中: h_1 为风机额定输出时概率; h_2 为欠额定状态时概率; h_3 为停机状态时概率。

根据文献[16],单场景下确定的无功优化方案通常不是满足全局最优方案,而全场景下所得方案是满足各场景约束的整体最优方案。因此,在全场景下用风机输出有功的期望值 P 近似代替风机出力不确定性。风电机组在全场景下有功输出期望值 P 为

$$P = \sum_{i=1}^3 h_i P_i = h_1 P_1 + h_2 P_2 \quad (5)$$

式中, P_1 、 P_2 分别为风机额定输出有功功率和欠额定输出有功功率。

2 配电网多目标无功优化模型

2.1 多目标无功优化目标函数

1)有功网损

对于系统节点电压越限情况,将采用惩罚因子的形式进行处理。因此,第 k 个场景下系统的有功网损可表示为

$$\begin{aligned} F &= P_{\text{loss}} + \lambda \sum_a \left(\frac{V_i - V_{\text{lim}}}{V_{\text{imax}} - V_{\text{imin}}} \right)^2 \\ &= \sum_{i=1}^L R_i \times \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} + \lambda \sum_a \left(\frac{V_i - V_{\text{lim}}}{V_{\text{imax}} - V_{\text{imin}}} \right)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: P_{loss} 为场景 k 下的有功损耗; R_i 为支路 i 的电阻; λ 为惩罚因子; P_i 、 Q_i 分别为支路 i 的有功、无功功率; V_{lim} 取值满足当 $V_i < V_{\text{imin}}$ 时, $V_{\text{lim}} = V_{\text{imin}}$, 当 $V_i > V_{\text{imax}}$ 时, $V_{\text{lim}} = V_{\text{imax}}$ 。

2)静态电压稳定指标

电力系统的静态电压稳定裕度是指在临界状态下系统有功功率与正常状态下系统有功功率的差值,用于衡量系统电压稳定性。当系统静态电压稳定裕度越大,表示系统具有越强的承载极限负荷的能力。这里采用的配电网静态电压稳定指标为

$$L_{ij} = 4[(P_j X_{ij} - Q_j R_{ij})^2 + (P_j R_{ij} + Q_j X_{ij}) \cdot V_i^2] / V_i^4 \quad (7)$$

式中: P_j 、 Q_j 为注入末端节点 j 的有功和无功功率, X_{ij} 、 R_{ij} 为支路 ij 的电抗和电阻; V_i 为首端节点 i 的电压。

配电网的静态电压稳定指标等于系统中所有支路稳定指标的最大值,即

$$L=\max\{L_1,L_2,\cdots,L_N\}\tag{8}$$

系统电压稳定性根据 L 与 1 之间的距离判断, L 越小于 1, 表示系统稳定性越好。

3) 无功补偿设备投资成本

无功补偿设备(电容器组)投资成本的数学描述为

$$Z=\sum_{i=1}^n(C\cdot Q_i)\tag{9}$$

式中: Z 为无功补偿设备总投资成本; C 为单位容量补偿电容器的价格; Q_i 为第 i 个无功补偿总容量; n 为系统总的无功补偿节点数。

各目标函数在全场景下的表示为

$$\begin{cases} f_1=\min(\sum_{k=1}^np_kF_k) \\ f_2=\min(\sum_{k=1}^np_kL_k) \\ f_3=\min(\sum_{k=1}^np_kZ_k) \end{cases}\tag{10}$$

式中: f_1 、 f_2 、 f_3 分别为系统有功网损、静态电压稳定指标、无功补偿设备投资成本; p_k 为各场景概率。

2.2 约束条件

1) 功率平衡约束条件为

$$\begin{cases} P_{G_i}-P_{D_i}=U_i\sum_{j\in N_i}U_j(G_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij}) \\ Q_{G_i}-Q_{D_i}=U_i\sum_{j\in N_i}U_j(G_{ij}\sin\theta_{ij}-B_{ij}\cos\theta_{ij}) \end{cases}\tag{11}$$

式中: N_i 为与母线 i 相连的所有母线的集合; P_{G_i} 、 Q_{G_i} 为节点 i 的有功、无功负荷; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点 i 和 j 之间的电导和电纳; G_{ii} 、 B_{ii} 为节点 i 的自电导和自电纳。

2) 节点电压约束

$$V_{\min}\leq V_i\leq V_{\max}\quad(i=1,2,\cdots,N)\tag{12}$$

3) 补偿点无功补偿容量约束

$$Q_{ci_{\min}}\leq Q_{ci}\leq Q_{ci_{\max}}\quad(i=1,2,\cdots,M)\tag{13}$$

式中, $V_{\max}$ 、 $V_{\min}$ 、 $Q_{ci_{\max}}$ 、 $Q_{ci_{\min}}$ 分别为节点电压、补偿无功容量的上、下限。

3 多目标差分进化算法及改进

3.1 基本定义

定义:(Pareto 支配) 如果向量 X_1 与 X_2 都是可行解, 当二者满足如下关系^[17]:

$$\begin{cases} f_m(X_1)\leq f_m(X_2),\forall m=1,2,\cdots,M \\ f_m(X_1)<f_m(X_2),\exists m=1,2,\cdots,M \end{cases}\tag{14}$$

称为 X_1 支配 X_2 , 记为 $X_1<X_2$ 。当 X 在可行域中找不到其他支配它的变量时, 将 X 称为 Pareto 最优解, 即非劣解。

3.2 差分进化算法

与其他进化算法类似, 差分进化算法同样需经过变异、交叉、选择等操作。

1) 变异操作

变异操作是由父代个体间的差异操作实现的, 即

$$V_i^{g+1}=U_{r1}^g+F\times(U_{r2}^g-U_{r3}^g),r1\neq r2\neq r3\neq i\tag{15}$$

式中: V_i^{g+1} 为生成的变异向量; F 为缩放因子。

2) 交叉操作

将变异向量与目标向量进行交叉操作, 以生成试验向量 w_{ij}^{g+1} , 具体描述为

$$w_{ij}^{g+1}=\begin{cases} v_{ij}^{g+1} & \text{if}(\text{rand}())\leq F_c\text{ or}(j=j_{\text{rand}(1,D)}) \\ x_{ij}^{g+1} & \text{otherwise} \end{cases}\tag{16}$$

式中: $\text{rand}()$ 为 $[0,1]$ 范围内服从均匀分布的随机数; $j_{\text{rand}(1,D)}$ 为 $[1,D]$ 范围内的随机整数; F_c 为交叉概率因子。

3) 选择操作

将目标向量与试验向量进行贪婪竞争实现选择操作, 即

$$U_i^{g+1}=\begin{cases} W_i^{g+1} & \text{if}f(W_i^{g+1})\leq f(U_i^g) \\ U_i^g & \text{otherwise} \end{cases}\tag{17}$$

3.3 改进差分进化算法

针对 DE 算法控制参数选择较盲目, 且后期随种群多样性下降而易陷入局部最优的不足, 引入免疫原理和二次变异的思想对 DE 算法进行改进。

3.3.1 免疫原理

根据文献[18]提出的疫苗形式, 提取了 DE 算法中种群的免疫疫苗, 并将该疫苗用于指导交叉操作概率因子的选取。疫苗具体提取方法如下:

1) 在第 g 代, 求出适应值排在种群规模前 $1/3$ 的个体, 记为优异个体, 并得到优异个体每一维变量取值范围, 记为

$$X=\begin{bmatrix} x_{1\min},\cdots,x_{n\min},\cdots,x_{N\min} \\ x_{1\max},\cdots,x_{n\max},\cdots,x_{N\max} \end{bmatrix}\tag{18}$$

式中, $x_{n\max}$ 、 $x_{n\min}$ 表示优异个体取值范围内第 n 维变量上限与下限。

2) 将适应值排在第 $1/3N_p+1$ (N_p 为种群规模) 的

个体记为 m_k 。对每维个体,求适应值大于 m_k 且符合式(18)范围的所有个体集合,记为 L_n 。如果 L_n 中个体数大于 $k/2$,则表示优异种群在该位置信息失效。

3)对疫苗中没有失效的信息,求 L_n 的并集 L_U

$$= \bigcup_{i=1}^N L_i$$
与交集 $L_\cap = \bigcap_{i=1}^N L_i$ (i 取值不含信息已失效的位置)。如果集合 L_U 个体数少于 $k/2$,表示优异种群对应位置信息有效;否则计算 $l_i = L_i - L_\cap$,最后求集合(l_i)中最大集合,记为 l_m ,表示该位置信息有一定指导意义。

对种群中所有个体 U_i^g 每维变量 x_n 进行交叉操作时,交叉概率因子 F_c 选取原则如下:

- 1)当取值范围在 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 以外,则 F_c 取为 1;
- 2)当取值范围在 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 以内,且第 n 维信息已失效,则 F_c 取为接近于 1 的较大值,使试验向量尽可能获得目标向量信息;
- 3)若取值范围在 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 以内,且其第 n 维信息具有一定指导意义,则 F_c 取为 $[0, 1]$ 范围内的中间值;
- 4)当第 n 维位置信息有效时,则 F_c 取为接近于 0 的较小值,使试验向量尽可能获得变异向量信息。

3.3.2 二次变异

为克服 DE 算法易陷入局部最优的不足,将变异思想引入差分进化算法中。首先设定一个阈值,当种群适应度方差 δ^2 小于该阈值时,选取最优个体及部分其他个体采用式(21)所示的高斯扰动法进行二次变异以改善种群多样性^[19]。

适应度方差 δ^2 表示种群的聚集程度, δ^2 越小则种群的聚集程度越高,多样性越低。 δ^2 计算公式为

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^{N_p} \left| \frac{m_i - \bar{m}}{m} \right|^2 \tag{19}$$

式中: m_i 为个体 i 适应值; $\bar{m}$ 为种群适应值的平均值; m 表示归一化因子,用于限制 δ^2 的大小,其取值为

$$m = \begin{cases} \max\{|m_i - \bar{m}| \}, (i \in [1, N_p]) \\ \text{if } \max\{|m_i - \bar{m}| \} > 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{20}$$

高斯扰动法表达式为

$$\begin{cases} x_{\text{best},j}^{g+1} = x_{\text{best},j}^g (1 + 0.5N(0,1)) \\ x_{i,j}^{g+1} = x_{i,j}^g (1 + 0.5N(0,1)) \end{cases} \tag{21}$$

式中, $N(0,1)$ 表示服从 $(0,1)$ 的高斯分布。

3.4 多目标差分进化算法

应用改进差分进化算法(improved differential evolution, IDE 算法)进行多目标优化时,需对算法做一定调整。首先将优异种群定义为所有的 Pareto 最优解,当 Pareto 最优解中个体总数大于种群一半时,随机选取 $N_p/2$ 个个体作为优异种群。二次变异标准是当所优化的目标函数中任何一个目标求得的 δ^2 小于所设阈值时,则对种群进行二次变异。

在更新 Pareto 最优解时,将第 g 代所得 Pareto 最优解与第 $g+1$ 代个体合并,然后通过支配关系筛选出非劣解集 X^* 。若 X^* 集合中个体数少于 N_p ,则将 X^* 作为第 $g+1$ 代的 Pareto 最优解集;若 X^* 集合中个体数大于 N_p ,则采用拥挤度距离排序方法筛选出距离排在前 N_p 的个体作为第 $g+1$ 代的 Pareto 最优解集。

基于 IDE 算法的多目标无功伏化流程如图 2 所示。

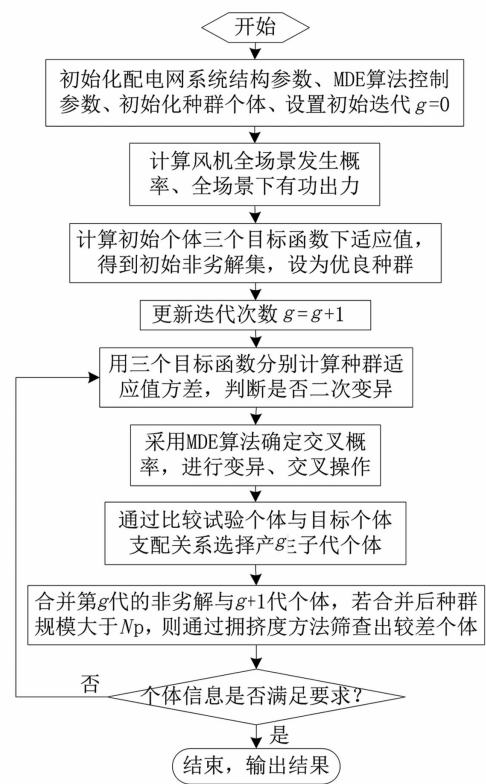


图 2 基于 IDE 算法的多目标无功优化流程

4 算例分析

以图 3 所示的 IEEE 33 节点配电网为例,该系统电压的基准值为 12.66 kV,有功负荷总计 3715 kW,无功负荷共计 2300 kW,其详细结构参数见文献

[20]。节点18、22、33各并入一台异步风力发电机,风机技术参数见文献[21]。风机的切入、额定和切出风速分别为3 m/s、12 m/s、21 m/s,地区风速服从韦布尔分布,其形状、尺度参数取值为 $k = 1.910\ 4$ 、 $c = 7.534\ 7$;风机额定输出、欠额定输出、停机输出的概率分别为0.125 8、0.796 3、0.077 9^[22],风机在这3种运行状态下有功出力为0.6 MW、0.3 MW、0 MW。并联电容器安装在节点8、节点12、节点17、节点26、节点30和节点32处,每个节点的电容器总容量为500 kVA,分成10个小组,单组容量50 kVA,电容器综合造价为70元/kVA。

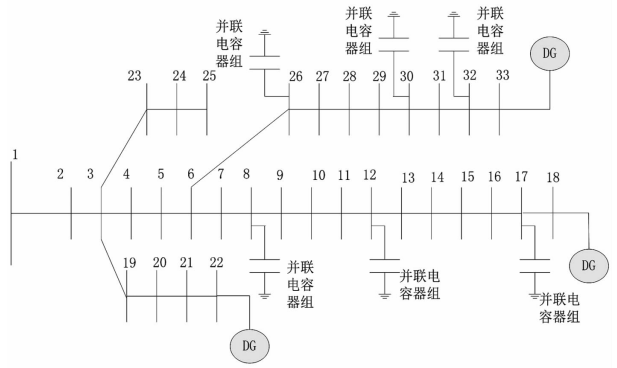


图3 IEEE 33节点配电网系统

在多目标无功优化时,分别将IDE算法、DE算法、PSO算法应用到上述系统中,以验证改进算法的有效性。图4至图6为3种算法优化结果。以3个指标最小为目标筛选得到的最小极端解见表1。

表1 Pareto最优解中极端解

指标	IDE	DE	PSO
有功网损/kW	164.7	164.8	165.1
静态电压稳定指标	0.052 9	0.052 5	0.056 8
无功补偿设备投资成本/万元	5.95	7.35	7.7

由图4至图6可得,3种算法在多目标无功优化后都得到了清晰的Pareto前沿,但3个目标之间是相互竞争、相互矛盾的。此外,IDE算法优化后得到3种算法中最多Pareto最优解,共计38组,且得到的Pareto前沿更加均匀、平稳,Pareto最优解也比较集中分布在使3个目标均优的区域。从表1中数据可知,经IDE算法优化除了在静态电压稳定指标极端解上略高于DE算法以外,其余指标均优于另外两种算法。这些都显示了所提改进算法的有效性与可行性。

为了能给决策者提供权衡3个目标的折衷优化方案,在分析IDE算法优化得到的一系列Pareto最

优解的基础上,列出了各目标折衷解及折衷的电容器组投切方案,如表2、表3所示。

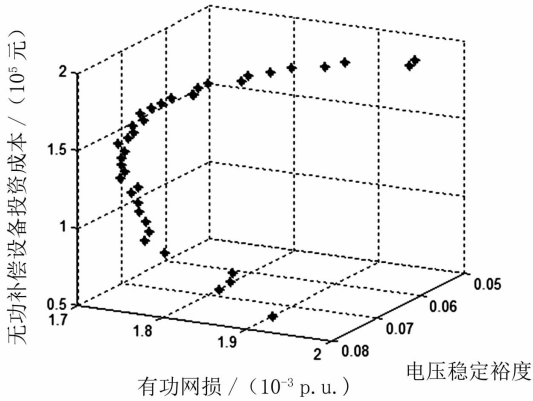


图4 IDE算法的Pareto前沿

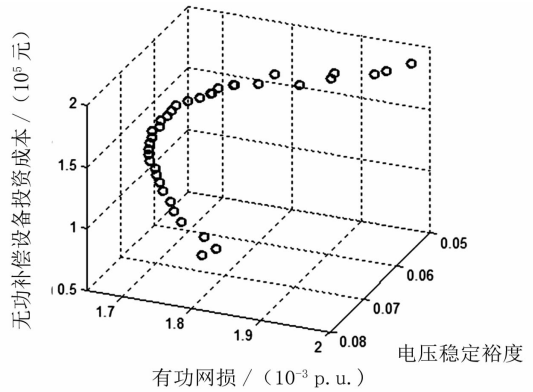


图5 DE算法的Pareto前沿

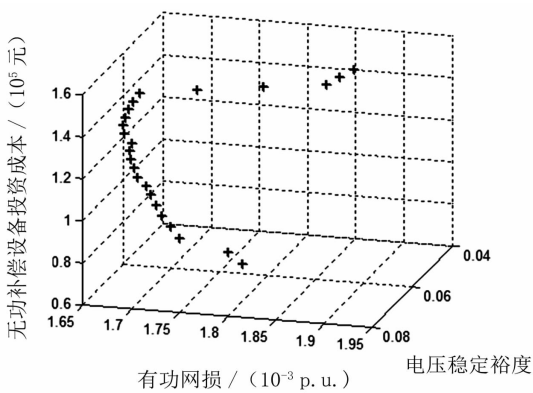


图6 PSO算法的Pareto前沿

表2 优化目标折衷解

优化目标	折衷解
有功网损/kW	171.6
静态电压稳定指标	0.059 78
无功补偿设备投资成本/万元	12.95

表3列出了5个电容器投切方案,每个方案是综合各可行解后得到的使有功损耗、静态电压稳定指标、无功补偿设备投资成本均较优的无功投切方案,即每个方案能同时兼顾电力系统运行的经济性、稳定性和安全性。

表3 电容器组投切折衷优化方案及目标值

方案	折衷方案	有功网损 /kW	静态电压 稳定 指标	无功补 偿设备 投资成 本 /万元
方案1	8(7)、12(0)、17(4)、 26(7)、30(10)、32(9)	166.2	0.063 30	10.50
方案2	8(2)、12(1)、17(4)、 26(7)、30(10)、32(9)	165.6	0.061 55	11.55
方案3	8(3)、12(8)、17(1)、 26(6)、30(10)、32(9)	166.1	0.059 78	12.95
方案4	8(2)、12(4)、17(5)、 26(9)、30(10)、32(6)	165.7	0.060 22	12.60
方案5	8(3)、12(7)、17(0)、 26(7)、30(8)、32(9)	165.8	0.061 11	11.90

5 结 论

前面结合免疫原理和二次变异思想对传统差分进化算法进行改进,并将改进后的算法应用于含风力发电机的配电网多目标无功优化中。基于场景概率方法,建立了全场景下包括有功网损、静态电压稳定指标及无功补偿设备投资成本3个目标的优化模型。算例分析结果验证,改进后的算法能获得更加均匀、稳定的 Pareto 前沿。此外,根据优化结果为决策者提供了5种折衷优化方案,它能有效地权衡电力系统经济性与稳定性。

参考文献

[1] 周任军,段献忠,周晖. 计及调控成本和次数的配电网无功优化策略[J]. 中国电机工程学报,2005,25(9): 23-28.

[2] 王志群,朱守真,周双喜,等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化,2004,28(16):56-60.

[3] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):35-40.

[4] 李新,彭怡,赵晶晶,等. 分布式电源并网的潮流计算[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(17):78-81.

[5] 陈琳,钟金,倪以信,等. 含分布式发电的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化,2006,30(14):20-24.

[6] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含风电机组的配网无功优化[J]. 中国电机工程学报,2008,28(7):40-45.

[7] 朱勇,杨京燕,高领军,等. 含异步风力发电机的配电

网无功优化规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012,40(5):80-84.

[8] 刘学平,刘天琪,李兴源. 含风电机组的配电网无功优化补偿[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(20):130-135.

[9] 张粒子,舒隽,林宪枢,等. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报,2000,20(6):5-8.

[10] Xiong H G,Cheng H Z,Li H Y. Optimal Reactive Power Low Incorporating Static Voltage Stability Based on Multi-objective Adaptive Immune Algorithm[J]. Energy Conversion and Management,2008,49(5):1175-1181.

[11] 赵树本,张伏生,钟继友,等. 自适应差分进化算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 电网技术,2010,34(6):169-174.

[12] 邱威,张建华,刘念. 自适应多目标差分进化算法在计及电压稳定性的无功优化中的应用[J]. 电网技术,2011,35(8):81-87.

[13] 刘述奎,陈维荣,李奇,等. 基于自适应聚焦粒子群优化算法的电力系统多目标无功优化[J]. 电网技术, 2009,33(13):48-53.

[14] Storn R,Price K. Differential Evolution - A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Space[J]. International Computer Science Institute,1995(8):22-25.

[15] 杨秀媛,肖洋,陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):1-5.

[16] 何禹清,彭建春,毛丽林,等. 含多个风电机组的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化,2010,34(19):37-41.

[17] 章萌,章卫国,孙勇. 多目标强度 Pareto 混沌差分进化算法[J]. 控制与决策,2012,27(1):41-46.

[18] 吴燕玲,卢建刚,孙优贤. 基于免疫原理的差分进化[J]. 控制与决策,2007,22(11):1309-1312.

[19] 吴亮红,王耀南,袁小芳,等. 自适应二次变异差分进化算法[J]. 控制与决策,2006,21(8):898-902.

[20] 王守相,王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京:高等教育出版社,2007.

[21] Feijao A E,Cidras J. Modeling of Wind Farm in the Load Flow Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2000,15(1):110-115.

[22] 刘沛津,谷立臣. 含风电场的电力系统无功规划优化[J]. 电网技术,2010,34(7):175-180.

作者简介:
冯 肯(1988),硕士研究生、工程师,主要从事电力系统分析与控制、智能配电网技术等相关工作。

(收稿日期:2018-08-14)

基于多维量测数据序列的电压互感器故障识别方法

龙 呈,刘明忠,常晓青,吴 杰,高艺文,段翔兮

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘要:电压互感器量测数据是电力系统监测与控制的基础,错误的量测数据可能导致自动装置错误动作和调度人员错误决策,因此,及时发现电压互感器故障至关重要。提出了一种基于多维量测数据序列的电压互感器故障识别方法,该方法能够在线监测所有类型的电压互感器。首先,利用经验模态分解方法对电压互感器测量数据进行去噪处理,消除坏数据干扰;其次,采用时间序列分层聚类方法对多维电压互感器量测数据进行分析,识别出故障的电压互感器;最后,将所提方法应用于某实际案例,验证了其合理性和有效性。

关键词:电压互感器故障识别;多维量测数据;经验模态分解;时间序列分层聚类

中图分类号:TM451 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)06-0066-05

Fault Identification Method of Voltage Transformer Based on Multidimensional Measurement Data Sequence

Long Cheng, Liu Mingzhong, Chang Xiaoqing, Wu Jie, Gao Yiwen, Duan Xiangxi

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:The measurement data of voltage transformer is the basis of monitoring and control of power system, false measurement data may result in malfunction of automatic device and inaccurate decision of operators, therefore, identifying the fault of voltage transformer timely is quite important. A fault identification method for voltage transformer is proposed based on multidimensional measurement data sequence, which can monitor all kinds of voltage transformer on line. Firstly, the empirical mode decomposition method is used to denoise the measurement data of voltage transformer so as to eliminate the disturbance of bad data. Secondly, the time series hierarchical clustering method is adopted to analyze the multidimensional measurement data of voltage transformer so as to identify the faulted voltage transformer. Finally, the proposed method is applied to a practical case and is verified to be reasonable and valid.

Key words:fault identification of voltage transformer; multidimensional measurement data; empirical mode decomposition; time series hierarchical clustering

0 引 言

随着电力系统智能化程度的不断深入,作为其基础的电力系统感知数据变得越来越重要。电压互感器量测数据是重要的感知数据源头之一,是实现电力系统智能分析与控制的前提条件^[1]。错误的量测数据不仅可能导致自动装置误动和拒动,还可能误导调度人员做出错误决策,严重影响电力系统安全稳定运行。然而,电压互感器故障是无法完全避免的,因此,亟需一种行之有效的电压互感器故障识别方法,当电压互感器发生故障时,能及时准确地

识别出故障,避免错误测量数据造成不良影响。

近年来,电压互感器故障识别技术受到了广泛研究,并形成诸多方法。这些方法可以归纳为以下两类:1)基于离线试验的故障识别方法;2)基于在线监测数据的故障识别方法。基于离线试验的故障识别方法能够准确分析故障原因,但受停电计划的限制,且难以准确反映在运电压互感器的运行状态。文献[2]通过电磁装置电压互感器吊心检查,发现高压绕组内部存在短路故障,并通过加压试验得到了进一步的证实。文献[3]通过电压互感器解体检查,发现分压电容器与电磁单元变压器之间的接线绝缘破裂导致互感器读数偏低。文献[4]通过电气试验发现中间

变压器高压侧存在匝间短路、部件烧坏或击穿等绝缘损坏,通过油样分析发现可能存在绕组匝间、层间短路等故障。基于在线监测数据的故障识别方法能够准确实时反映在运电压互感器的运行状态,及时发现故障,避免错误量测数据导致不良后果。文献[5]通过建立电容式电压互感器中电容击穿个数与二次电压波动的关系,结合 EMS 中的二次电压量测值,识别电压互感器故障原因。文献[6]利用电压互感器量测值分析了一起电容式电压互感器底座上端发热故障的原因,结果与离线试验分析结果相一致。文献[7]研制了一种包括电压监测装置、数据处理装置、同步时钟装置、交换机、服务器和远程接收装置的电容式电压互感器误差在线监测系统。文献[8]提出了一种直流电压互感器在线监测系统,通过监测和提取直流电压互感器典型故障的电流特征量识别故障原因,包括雷电干扰、闪络和电容击穿。

上述基于在线监测数据的故障识别方法均是结合电压互感器的结构特点和故障特征,通过分析某一个电压互感器的量测数据识别故障。这些方法仅适用于特定类型、特定结构的电压互感器,普适性较差。下面提出了一种基于多维量测数据序列的电压互感器故障识别方法,属于在线监测数据的故障识别方法。该方法通过在线分析多个电压互感器的量测数据识别故障,无需利用电压互感器的结构特征,适用于所有类型的电压互感器。首先,利用经验模态分解法对电压互感器量测数据进行去噪处理,消除噪音干扰;其次,利用时间序列分层聚类法对多维电压互感器量测数据进行分析,识别电压互感器故障位置。

1 基于经验模态分解的信号去噪

经验模态分解是一种基于信号局部特征的信号分解方法,该方法吸取了小波变换多分辨率的优势,同时克服了小波变换选取小波基与确定分解尺度的困难,是一种自适应信号分解方法^[9]。基于经验模态分解的信号去噪^[10-11]的基本思路如下:首先是信号分解,即利用经验模态分解法将原始信号分解为多个分量信号;其次是信号去噪,即分别对各分量信号进行去噪处理后,再通过信号叠加得到去噪信号。

1.1 信号分解

经验模态分解方法假设所有信号都是由若干个固有模态函数(intrinsic modefunction, IMF)和一个残

余量(residual volume, RV)组成,其中 IMF 满足以下两个条件:1)信号的极值点个数与过零点个数之差必须等于或小于 1;2)信号的上、下包络线的均值为 0。通过经验模态分解,任何信号 s 都可以表示为

$$s = \sum_{i=1}^N f_i + V_r \tag{1}$$

式中: f_i 为第 i 个 IMF; V_r 为 RV; N 为 IMF 的总数。

经验模态分解过程就是获取 f_i 和 V_r 的过程,具体步骤如下:

- 1)令 $i = 1$;
- 2)令 $x = s$;
- 3)利用三次样条函数对 x 的极大值点进行曲线拟合,得到上包络线 u ;
- 4)利用三次样条函数对 x 的极小值点进行曲线拟合,得到下包络线 v ;
- 5)求取上、下包络线的均值 $m = (u + v)/2$;
- 6)求取 x 与包络线均值的差值 $d = x - m$;
- 7)判断 d 是否满足 IMF 的两个条件,若是,则令 $f_i = d, i = i + 1$,否则,令 $x = d$ 并进入步骤 3);
- 8)判断 f_i 是否为单调函数,若是,令 $V_r = s - f_i$,否则,令 $s = s - f_i$ 并进入步骤 2)。

1.2 信号去噪

信号去噪的基本思路为:首先,采用阈值法对每个 IMF 进行处理;其次,对处理后的 IMF 和 RV 进行信号叠加,得到去噪信号。阈值去噪法包括硬阈值去噪法和软阈值去噪法,硬阈值方法可以很好地保留图像边缘等局部特性,而软阈值处理可以使图像边缘更加平和。结合电压互感器量测数据及其在所提方法的应用特点,采用软阈值去噪法,具体步骤如下:

- 1)求取 f_i 的阈值 t_i 。

$$t_i = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{t=1}^L (f_i(t) - \bar{f_i})^2} \cdot \sqrt{2 \lg L} \tag{2}$$

式中: L 为 f_i 的长度; $f_i(t)$ 为 f_i 的第 t 个分量; $\bar{f_i}$ 为 f_i 的平均值。

- 2)对 f_i 进行软阈值处理,处理后的 f_i 记为 F_i 。

$$F_i(t) = \begin{cases} f_i(t) - t_i, & f_i(t) \geq t_i \\ 0, & |f_i(t)| < t_i \\ f_i(t) + t_i, & f_i(t) \leq -t_i \end{cases} \tag{3}$$

- 3)通过信号叠加求和,得到去噪信号 S 。

$$S = \sum_{i=1}^N F_i + V_r \tag{4}$$

2 基于时间序列分层聚类的故障判定

2.1 时间序列相似性度量

时间序列是指在相同时间间隔下获得,并且和时间变化顺序相关的序列值的集合^[12]。时间序列相似性度量是时间序列数据挖掘的基础,一般通过时间序列之间的距离来衡量,距离越小,相似性越大,反之亦然^[13]。时间序列之间的距离通常采用欧氏距离、动态弯曲距离和编辑距离,这里结合电压互感器量测数据及其在所提方法的应用特点,采用欧氏距离。设有时间序列 $X = \{x_i\}$ 和 $Y = \{y_i\}$, 则 X 和 Y 的欧氏距离 $d_{X,Y}$ 为

$$d_{X,Y} = \sqrt{\sum_i (x_i - y_i)^2} \tag{5}$$

一个或多个相似时间序列组成一个时间序列类,时间序列类的相似性采用平均欧氏距离表征,平均欧氏距离越小,相似性越大,反之亦然。设有两个时间序列类 $X = \{X_i\}_m$ 和 $Y = \{Y_i\}_n$, 其中 X_i 和 Y_i 为时间序列,则 X 和 Y 的平均欧氏距离 $D_{X,Y}$ 为

$$D_{X,Y} = \frac{1}{m \times n} \sum_{X \in X, Y \in Y} d_{X,Y} \tag{6}$$

若有 M 个时间序列类 $X_1, X_2, \dots, X_M$, 可采用距离矩阵 D 表示所有时间序列类之间的距离。

$$D = \begin{bmatrix} 0 & D_{1,2} & \cdots & D_{1,i} & \cdots & D_{1,M} \\ D_{2,1} & 0 & \cdots & D_{2,i} & \cdots & D_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{i,1} & D_{i,2} & \cdots & 0 & \cdots & D_{i,M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{M,1} & D_{M,2} & \cdots & D_{M,i} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中, $D_{i,j} = D_{x_i, x_j}$ 。

2.2 时间序列分层聚类

时间序列分层聚类^[14-15]是以时间序列为研究对象进行分层聚类分析,首先将所有时间序列均看作不同的类,然后依次将最相似的两个类合为一类,依此类推,直到满足某一阈值条件或所有时间序列合为一类。

设有一组时间序列 $X = \{X_i\}_N$, 则时间序列分层聚类的步骤如下:

1) 把每个时间序列 X_i 看作是一个时间序列类 X_i , 计算距离矩阵, 记为 D_1 , 令 $D_{p1,q1} = \min(D_1)$, 其中 $\min$ 表示取最小值;

2) 把时间序列类 X_{p1} 和 X_{q1} 包含的所有时间序列合为一个时间序列类, 其他时间序列类不变, 计算距离矩阵, 记为 D_2 , 令 $D_{p2,q2} = \min(D_2)$;

3) 依此类推, 直至某一次 $D_{pi,qi}$ 大于阈值 D_{thr} 或全部时间序列合为一类。

2.3 分层聚类阈值确定及故障判定

在 500 kV 电压等级中,电压互感器的允许测量误差为 2‰。考虑到断路器和隔离开关的接触电阻等因素,当任意两回出线的电压互感器量测值之差超过 6‰(即 2.2 kV) 时,则认定有电压互感器发生故障。

利用 24 h 内每隔 1 h 的电压互感器量测值进行分析,每个电压互感器的 24 个量测值形成一个时间序列。结合上述电压互感器故障判定方法,可根据式(8)设定分层聚类阈值 D_{thr} 为 11。

$$D_{thr} = \sqrt{\sum_i (x_i - y_i)^2} = \sqrt{24 \times 2.2^2} \approx 11 \tag{8}$$

由于多个电压互感器同时故障的概率很小,因此,当利用时间序列分层聚类将电压互感器分为两类及以上时,则认定包含电压互感器数量最多的一类是非故障互感器,而其他是故障电压互感器。

3 案例分析

四川宜宾 500 kV 叙府变电站的 500 kV 部分包括 11 回出线,分别是 1 号主变压器高压侧、2 号主变压器高压侧、沐叙一线、沐叙二线、叙泸一线、叙泸二线、戎叙一线、戎叙二线、平叙一线、宾叙一线、宾叙二线。春季检修时发现宾叙一线 A 相和宾叙二线 C 相的两台 500 kV 电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT) 出现电容介损异常,经返厂解剖试验,发现这两台 CVT 发生电容击穿。

为了避免三相运行不平衡的影响,将所提方法分别应用于上述 11 回出线的各相 CVT 的量测数据。

1) 信号去噪

以 A 相 CVT 量测数据为例展示信号去噪效果。

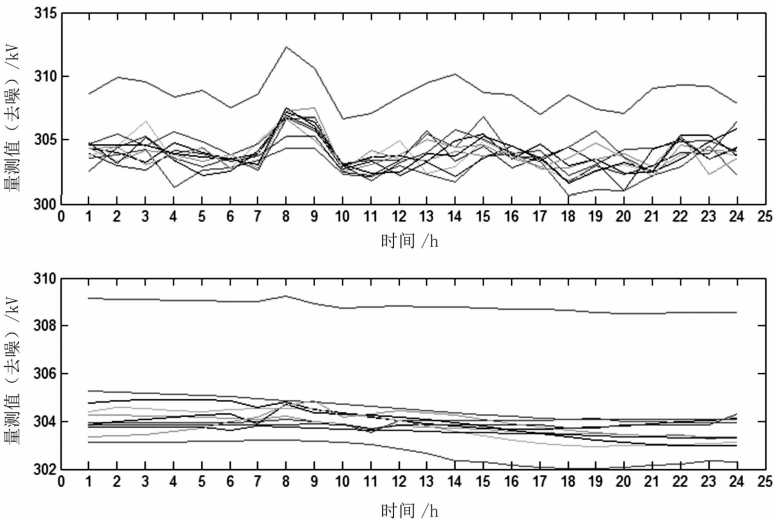


图1 去噪前后的A相CVT量测数据

叙府变电站500kV11回出线A相CVT的连续24个时刻的量测值如图1所示,其中,上半部分是原始数据,下半部分是利用基于经验模态分解的信号去噪法处理后的数据。

由图1可以看出,利用基于经验模态分解的信号去噪,可有效消除信号噪声,提高数据可用性,为下一步基于时间序列分层聚类的故障识别提供有利条件。

2)电压互感器故障识别

利用时间序列分层聚类分别对A、B、C三相CVT量测数据进行聚类分析,并进行可视化展示,分别如图2、图3、图4所示。图中,横坐标表示相应出线的电压互感器编号,1为沐叙二线,2为沐叙一线,3为1号主变压器高压侧,4为叙泸一线,5为叙泸二线,6为2号主变压器高压侧,7为戎叙一线,8为戎叙二线,9为平叙一线,10为宾叙二线,11为宾叙一线;纵坐标表示时间序列类之间的平均欧氏距离;两个时间序列类的平均欧氏距离由连接它们的横线的高度表示。

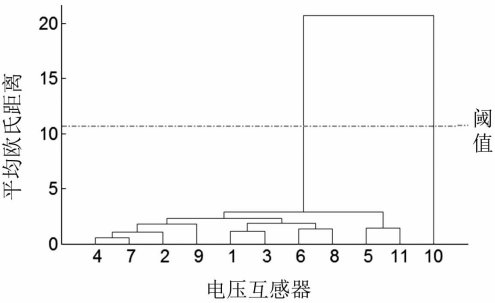


图2 A相CVT量测数据聚类结果可视化

由图2可知,电压互感器1、2、3、4、5、6、7、8、9和11号A相的量测数据序列之间的平均欧氏距离均小于阈值,而电压互感器10的量测数据序列与上述电压互感的量测数据序列的平均欧氏距离大于阈值,由此可以判定电压互感器10,也就是宾叙一线A相的电压互感器发生故障。

由图3可知,B相所有电压互感器的量测数据序列的平均欧氏距离均小于阈值,由此可以判定B相无电压互感器发生故障。

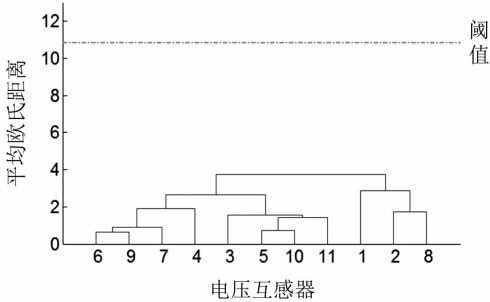


图3 B相CVT量测数据聚类结果可视化

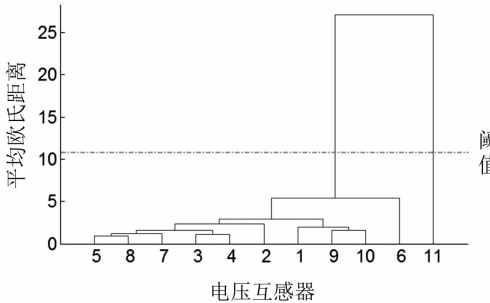


图4 C相CVT量测数据聚类结果可视化

由图4可知,电压互感器1、2、3、4、5、6、7、8、9

和 10 号 C 相的量测数据序列之间的平均欧氏距离均小于阈值,而电压互感器 11 的量测数据序列与上述电压互感器的量测数据序列的平均欧氏距离大于阈值,由此可以判定电压互感器 11,也就是叙二线 C 相的电压互感器发生故障。

综上可知,所提方法的分析结果与电压互感器的实际故障情况一致,从而表明了所提方法的正确性。

4 结 语

前面提出了一种基于多维量测数据序列的电压互感器故障识别方法,通过分析多个电压互感器的在线量测数据,能够准确实时地识别电压互感器故障,且适用于所有类型的电压互感器。该方法首先利用经验模态分解法对电压互感器量测数据进行去噪处理;然后,利用时间序列分层聚类法对电压互感器量测数据进行分析,识别电压互感器故障;最后,将所提方法应用于实际电压互感器量测数据,结果显示所提方法能够有效消除量测数据噪声,并准确识别出发生故障的电压互感器,从而验证了方法的合理性和有效性。

参考文献

[1] 张东霞,苗新,刘丽平,等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报,2015,3(1):2-12.

[2] 陈文龙. 浅析两起 110 kV 电容式电压互感器故障[J]. 高压电器,2005,31(1):80-80.

[3] 席风沛. 电容式电压互感器故障分析处理[J]. 变压器,2010,47(6):71-72.

=====

(上接第 36 页)

[16] 周悦. 电线积冰形成机理研究:观测和模拟[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.

[17] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.

[18] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2004.

[19] 袁明友,肖先勇,杨洪耕,等. 基于灰色理论的供电系统负荷中长期预测模型及其应用[J]. 四川大学学报(工程科学版),2002,34(4):33-35.

[20] 崔立志. 灰色预测技术及其应用研究[D]. 南京:南

[4] 郑坚强,陶涛,万文博. 浅析一例 110kV 电容式电压互感器二次电压失压故障[J]. 变压器,2012,49(7):73-76.

[5] 林浩,倪学锋,王岩,等. 基于 EMS 数据的电容式电压互感器在线监测系统研究[J]. 电测与仪表,2015,52(4):1-7.

[6] 邱太洪,罗容波,李国伟,等. 电容式电压互感器二次电压在线监测在故障检测分析中的应用[J]. 变压器,2015,52(9):70-73.

[7] 张福州,刘鹗,黄嘉鹏,等. 电容式电压互感器误差在线监测系统的研制[J]. 电测与仪表,2016,53(s1):53-57.

[8] 李坤,邵明鑫,汪本进,等. ±1100 kV 直流电压互感器在线监测系统研究[J]. 高压电器,2017,12(6):1-7.

[9] 郑祖光. 经验模态分析与小波分析及其应用[M]. 北京:气象出版社,2010.

[10] 贾嵘,徐其惠,田录林,等. 基于经验模态分解和固有模态函数重构的局部放电去噪方法[J]. 电工技术学报,2008,23(1):13-18.

[11] 钱勇,黄成军,陈陈,等. 基于经验模态分解的局部放电去噪方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(12):53-56.

[12] 杨位钦,顾岚. 时间序列分析与动态数据建模(修订本)[M]. 北京:北京理工大学出版社,1988.

[13] 陈湘涛,李明亮,陈玉娟. 基于时间序列相似性聚类的应用研究综述[J]. 计算机工程与设计,2010,31(3):577-581.

[14] 方开泰,潘恩沛. 聚类分析[M]. 北京:地质出版社,1982.

[15] 吕黎. 面向相似性的时间序列聚类方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.

作者简介:
龙 呈(1987),博士,主要从事变电站自动化技术研究。
(收稿日期:2018-07-25)

京航空航天大学,2010.

[21] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.

[22] 汪进峰. 高压输电线路安全运行状态分析建模与仿真[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.

作者简介:
莫思特(1969),副教授、博士,研究方向为电气工程;
曾 琦(1977),博士、讲师,研究方向为电力系统稳定和控制、高压直流输电。
(收稿日期:2018-08-19)

一起 500 kV HGIS 外置式电流互感器线圈受潮缺陷分析及处理

唐 静,罗 洋,龙震泽

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘 要:针对一起 500 kV HGIS 外置式电流互感器受潮的案例开展分析,结合该类设备结构,找出了受潮原因,提出了防潮措施以及受潮电流互感器的干燥措施。通过案例的分析认为,该类型外置式电流互感器结构在户外运行时极易导致雨水进入,应加强密封;当电流互感器线圈受潮时,采用电加热和热风法相结合的方式能够取得较好的效果。

关键词:HGIS;外置式电流互感器;受潮;干燥措施

中图分类号:TM595 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)06-0071-04

Analysis and Treatment of An Damping Defect of External Current Transformer Winding of 500 kV HGIS

Tang Jing, Luo Yang, Long Zhenze

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:Based on the analysis of a damping defect of external current transformer of 500 kV HGIS, the reasons of damping are found out and the moisture-proof measures and drying measures are put forward for current transformer. Through the analysis and treatment of the case, it is believed that the rainwater can easily get into this type of external current transformer when it is running outdoors, and the sealing should be strengthened. When the coil of current transformer is damped, the combination of electric heating and hot air method can achieve wonderful results.

Key words:hybrid gas insulated switchgear (HGIS); external current transformer; damping; drying measures

0 引 言

HGIS(hybrid gas insulated switchgear)是一种介于气体绝缘金属封闭开关(gas insulated switchgear, GIS)和空气绝缘敞开式开关设备(air insulated switchgear, AIS)之间的新型高压开关设备。HGIS的结构与GIS基本相同,但母线设备不装于SF₆气室,是外露的,少了封闭母线间隔,减少了因场地或出线等的特殊设计问题,间隔更清晰、简单^[1-2]。无论从试验、检修、维护等都减少了工作量^[3-4]。相对敞开式结构,隔离开关不存在过热、锈蚀等问题,减少了对地绝缘套管和支柱数(仅为常规设备的30%~50%)。减少了绝缘支柱因污染造成对地闪络的概率,有助于提高运行可靠性。

HGIS以其较大的优势在国内得到了广泛的应用,随着HGIS在电网中运行时间的增加,由于结构设计、安装瑕疵等造成的缺陷逐步显露,给电网安全运行带来了威胁。

下面针对一起500 kV变电站HGIS外置式电流互感器普遍受潮的缺陷进行分析,提出了相应的受潮处理措施和防潮措施,对今后处理类似缺陷具有较大的借鉴意义。

1 基本情况

某供电公司在对一座500 kV变电站500 kV HGIS的5061断路器I母侧电流互感器A相二次绝缘进行检查时,发现该电流互感器对地、各互感器线圈之间绝缘

为 0(交接试验规程要求二次绝缘不低于 1000 MΩ)^[5]。打开外壳后发现内部有积水,电流互感器线圈受潮、互感器舱室内部发霉严重,如图 1 所示。



图 1 互感器舱室内部积水及发霉情况

在发现互感器舱室进水,线圈受潮缺陷后对 I 母的 HGIS 外置式电流互感器进行了试验排查,结果如表 1 所示(表中的值是互感器线圈之间、线圈对地绝缘电阻中的最小值)。

表 1 500 kV I 母开关电流互感器排查情况

单位:MΩ

断路器编号	相别	I 母侧	II 母侧
5011	A	300	0
	B	150	200
	C	60	600
5021	A	500	300
	B	500	500
	C	> 1000	200
5032	A	200	500
	B	300	200
	C	250	160
5041	A	500	30
	B	400	300
	C	25	400
5051	A	600	350
	B	400	350
	C	400	500
5082	A	> 1000	> 1000
	B	> 1000	> 1000
	C	400	> 1000
5033	A	> 1000	0
	B	> 1000	> 1000
	C	> 1000	> 1000
5062	A	500	200
	B	250	300
	C	> 1000	> 1000

从表 1 可知,排查的 48 个电流互感器舱室有 35 个绝缘不满足规程要求,占比达 73%,说明这是一个普遍存在的问题。II 母可能也存在相同的问题。

该站 500 kV HGIS 采用外置电流互感器的结构,即电流互感器的线圈套于 HGIS 管体外部,然后采用一个舱室对其进行封装。这种外置式结构相对来说更适合应用于室内,当应用于室外时对其防水应有较高的要求。

2 受潮原因分析

通过现场观察分析认为该互感器外置结构适用于户内,在户外运行时容易导致进水受潮。经过现场的仔细检查和分析,认为进水的途径主要有以下两方面:

1)二次端子盒进水

二次电缆出线的护套采用直线布置,如图 2(a)所示,且二次端子盒在电缆出口处未采取封堵措施,如图 2(b),导致雨水沿二次电缆护套进入二次接线盒,接线盒内的 CT 端子引出处也未采取封堵措施,如图 2(c),导致雨水从接线盒进入 CT 箱体内部。

2)电流互感器箱体上部连接螺栓处进水

雨水通过图 3(a)中“1”所示的缝隙进入“2”所示的夹层;夹层中的螺栓(如图 3(b)中“3”所示)和呼吸孔(如图 3(b)中“4”所示)未采用防水密封垫,导致水沿着螺栓和呼吸孔进入电流互感器箱体内部,如图 3(c)中“5”所示。

3 受潮电流互感器干燥处理

由于本次受潮的电流互感器较多,如均采取停电处理将造成 I 母较长时间停电,不但影响负荷还会影响供电可靠性。为此将绝缘电阻大于 200 MΩ 的互感器暂时先投入运行,对绝缘电阻低于 100 MΩ 的电流互感器进行处理。处理方式主要有更换和干燥两种方式。如果采取更换方式,需要将整个间隔拆除,工程量非常大,因此首先采用干燥的方法进行处理,待绝缘恢复后再通过轮停的方式对其他电流互感器进行处理。

3.1 热风干燥法

通过如图 4 所示的特制 CT 箱体进行热风干燥,该特制的 CT 箱体上部留有 4 个进风口,下部 2

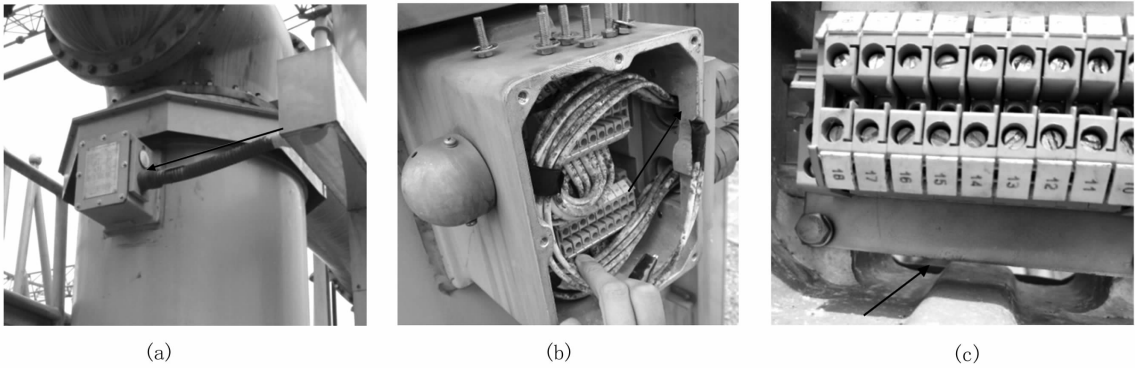


图 2 雨水从端子盒进入 CT 箱体内部示意

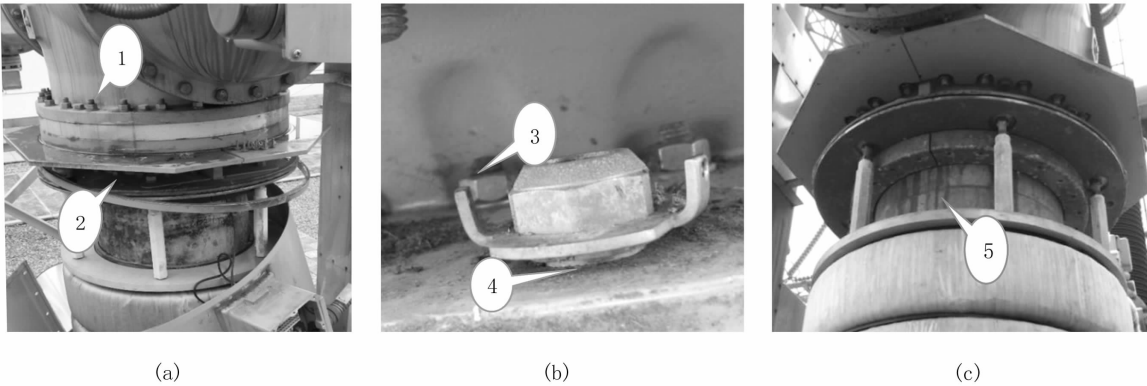


图 3 雨水从螺栓处进入的示意

个出风口。利用该箱体替代原有箱体将 CT 线圈包裹在其内部,利用热风机 24 h 不间断地进行热风干燥。

- 但这种方法具有以下缺点:
- 1) 需要把 CT 外壳拆除,同时设计制作一个新的热风箱体与配套设备,由于需要一定的硬件条件,工作量较大;
 - 2) 由于箱体相对比较密封,干燥时产生的水蒸气容易往电流互感器线圈内部扩展,导致受潮范围扩大;
 - 3) 热风对电流互感器线圈表面干燥较快,但对线圈内部不容易干燥。



图 4 特制的电流互感器箱体

3.2 电流加热法

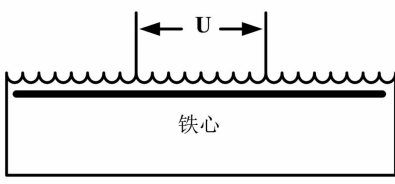
由于热风法存在上述缺点,在实施过程中很难较快达到理想的干燥效果,为此提出采用电加热法对其进行补充。

电加热方法的思路是利用电流互感器线圈自身进行短路加热。由于电路互感器线圈直流电阻相对较大,只需要较小的电流就可以获得较大的温升,同时不需要较高的电压,不会损坏线圈的绝缘。

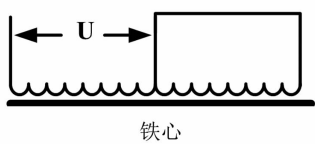
电加热的方法如下:

- 1) 对于有 2 个抽头(4 个端子)的线圈,短接首尾端,利用调压器在两个抽头间施加电压;对于只有 1 个抽头(3 个端子)的线圈,短接抽头与尾端,利用调压器在首端和抽头间施加电压,如图 5 所示。
- 2) 同时为了避免温度过高损伤绝缘,提出采用测量直流电阻换算温度的方法来获得绕组内部温度,并对其进行控制,即通过电压电流得到加压部分线圈电阻进而获得不同时刻的直流电阻值,再根据铜线电阻与温度关系获取铜线温度。本次处理通过调压器调节线圈中的电流,将导线的温度控制在绝

缘能够承受的 85 ℃ 之内。



(a) 具有 4 个端子的 CT 加热方式



(b) 具有 3 个端子的 CT 加热方式

图 5 交流短路加热接线

采用电加热的优点有:1)可以从线圈内部进行加热,对内部受潮的干燥效果较好;2)线圈整体受热较为均匀,且温度可控。

4 进水封堵措施

针对现场发现的进水渠道采取有针对性的封堵措施:

- 1)将二次接线盒与 CT 箱体通道以及二次电缆护套在进入二次接线盒的地方采取密封措施;
- 2)更换二次电缆护套,并采用 U 形布置,并在 U 形管的下部开口,便于雨水漏出;
- 3)在图 3 所示的夹层中的螺栓、呼吸孔下部、电流互感器箱体的连接接缝处采用打胶的方式密封。

(上接第 40 页)

分验证了励磁涌流仿真评估方法的准确性,也为主变压器消磁效果评价提供了一种手段。

参考文献

[1] 张晓洁,杨勃,陈垒,等.一种基于磁滞回线的变压器剩磁计算方法研究[J].变压器,2015,52(10):11-13.

[2] 乌云高娃.变压器励磁涌流的分析与控制研究[D].武汉:武汉大学,2009.

[3] 戈文祺,汪友华,陈学广,等.电力变压器铁心剩磁的测量与削弱方法[J].电工技术学报,2015,30(16):10-16.

[4] 郝治国,张保会,褚云龙,等.变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究[J].高压电器,2005,41(2):81-84.

5 结 语

通过对本次缺陷的分析和处理得出以下结论:

- 1)该形式的外置式电流互感器在户外使用时,由于其结构形式极易造成外部水分进入互感器腔体内部,从而导致互感器线圈受潮,安装时应加强其密封,避免雨水进入;
- 2)当电流互感器线圈受潮时,不用盲目地更换线圈,可以采取热风和电加热的方法进行干燥处理。

参考文献

[1] 冯昌远. GIS 的运行经验和现场试验[J]. 高压电器, 2000, 36(1):49-53.

[2] 傅旭华. 组合式高压电器(HGIS)的特点浅析[J]. 浙江电力, 2006, 25(3):67-68.

[3] 鲁旭臣,李爽,毕海涛,等. 辽宁电网 GIS 与 HGIS 运行可靠性和实用性分析[J]. 东北电力技术, 2014, 35(9):20-22.

[4] 印华,姚强,王勇,等. 一起 GIS 事故的分析与处理[J]. 高压电器, 2009, 45(2):122-123.

[5] 电气装置安装工程电气设备交接试验标准:GB 50150-2016[S],2016.

作者简介:

唐 静(1988),硕士研究生、工程师,现从事综合计划、物资计划、资金项目管理工作。

(收稿日期:2018-08-30)

[5] 黄金,方春恩,李天辉,等.计及剩磁的变压器励磁涌流的仿真研究[J].变压器,2009,46(11):40-43.

作者简介:

周 波(1989),工程师,主要从事电力系统稳定与控制技术和新能源发电控制技术研究;

常晓青(1965),高级工程师,主要从事电力系统稳定与控制技术研究;

张 华(1985),高级工程师,主要从事电力系统稳定与控制技术研究;

魏 巍(1984),高级工程师,主要从事电力系统稳定与控制技术研究;

史华勃(1987),工程师,主要从事电力系统稳定与控制技术研究。

(收稿日期:2018-08-24)

钢芯高强度耐热铝合金导线在 500 kV 大跨越工程中应用

罗 强¹, 罗浩元²

- (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. 国网重庆市电力公司检修分公司, 重庆 400039)

摘 要:以重庆万州神华 500 kV 线路长江大跨越工程为例,通过对不同大跨越导线应用方案的载流量、电磁环境、荷载、工程投资等技术经济指标进行了对比分析,结果表明钢芯高强度耐热铝合金导线具有明显的优势,可以在今后的低海拔大跨越工程中广泛应用。

关键词:输电线路;大跨越;导线比选;工程应用

中图分类号:TM751 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)06-0075-05

Comparison and Selection of Heat – resistance Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced with High Strength for Wangzhou Changjiang Large Span Installation and Its Application

Luo Qiang¹, Luo Haoyuan²

- (1. Southwest Electric Power Research Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China;
2. State Grid Chongqing Maintenance Company, Chongqing 400039, China)

Abstract:The comparison and selection of conductors are introduced in Changjiang river crossing project of Shenhua 500 kV transmission line in Wanzhou, Chongqing. The JGQNRLH/EST – 630/80 heat – resistant aluminum alloy conductor steel reinforced with high strength is selected from 6 different large span conductors through calculating the allowing current of conductor, the electromagnetic environment of all kinds of bundled conductor and the load of tower, and comprehensively comparing and analyzing the economy and technology.

Key words:transmission line; large span; conductor comparison and selection; engineering application

0 引 言

大跨越工程的导线选择非常关键。导线特性对跨越塔的高度和运行荷载起关键作用,也决定了输电损耗和效率以及机电过载能力。只有选择最佳导线方案,才能确保跨越段工程具有良好的技术经济性和较高的运行安全性。大跨越工程在选择导线时应考虑输送容量、电磁环境、机械性能、制造条件等因素,合理控制导线平均运行应力和弧垂等。

目前,国内外 500 kV 大跨越设计一般采用的导线主要有(特强)钢芯(高强度)铝合金绞线、钢芯

(高强度)耐热铝合金绞线、铝包钢绞线、钢芯铝包钢绞线等。

钢芯高强度耐热铝合金导线是在钢芯铝合金导线的基础上将其钢芯加强采用高强度钢芯,同时在铝合金中加入金属锆(Zr)元素后制造出的一种新型导线,在低海拔地区钢芯高强度耐热铝合金导线由于其连续运行温度及短时容许温度比常规钢芯铝绞线(ACSR)高 60 ℃,分别达到 150 ℃ 及 180 ℃,从而大大提高了输电能力,同时其机械特性也较常规钢芯铝绞线(ACSR)大大提高。

下面以重庆万州 500 kV 长江大跨越工程为例,对比分析计算了 6 种大跨越导线方案,结果表明高

强度耐热铝合金导线方案具有明显优势,为今后低海拔地区 500 kV 大跨越工程提供参考。

额定电流: $2 \times 1277 \text{ A}$
系统最大输送容量: 2400 MVA/回 ;
 $N-1$ 情况下导线载流量: $1 \times 2917 \text{ A}$ 。

1 工程概况

万州神华 500 kV 线路长江大跨越工程采用同塔双回路架设,跨越段线路全长 $2 \times 1.512 \text{ km}$ 。
跨越方式:耐-直-直-耐;
跨越档距: $101 \text{ m}/1247 \text{ m}/164 \text{ m}$;
铁塔呼高: $39 \text{ m}/86 \text{ m}/84.5 \text{ m}/25 \text{ m}$
铁塔全高: $78.5 \text{ m}/124.6 \text{ m}/123.1 \text{ m}/64.55 \text{ m}$
系统额定输送容量: $2 \times 1050 \text{ MVA}$;

2 导线初步对比分析

初步比选从载流量、电磁环境影响、电能损失、机械性能等方面开展对比分析。

2.1 候选对比方案

候选方案有特强钢芯铝合金绞线等 6 种,其中钢芯高强度耐热铝合金绞线采用 2 分裂,其余采用 4 分裂,具体方案和导线参数如表 1、表 2 所示。

表 1 万州神华 500 kV 线路长江大跨越导线候选方案

导线方案	导线类别	型号	分裂数
方案 1	特强钢芯铝合金绞线	AACSR/EST-410	4
方案 2	钢芯铝合金绞线	JLHA1/G3A-315-26/7	4
方案 3	钢芯铝合金绞线	JLHA1/G1A-400/50	4
方案 4	钢芯高强度耐热铝合金绞线	JGQNLH/EST-630/80	2
方案 5	钢芯高强度耐热铝合金绞线	JGQNLH55/EST-690/180	2
方案 6	铝包钢绞线	AS-400	4

表 2 导线机械特性

型号	AACSR/ EST-410	JLHA1/G3A- 315-26/7	JLHA1/G1A- 400/50	JGQNLH/ EST-630/80	JGQNLH55 /EST-690/180	AS-400
结构	铝合金 38×3.7 钢芯 37×2.29	铝合金 26×4.23 钢芯 7×3.29	铝合金 54×3.07 钢芯 7×3.07	铝合金 54×4.05 钢芯 19×2.43	铝合金 72×3.5 钢芯 19×3.5	铝包钢 37/3.7
截面积/mm ²	560.97	426.00	451.54	783.77	875.52	397.83
其中:铝(合金) /mm ²	408.58	366.00	399.72	695.66	692.72	171.07
钢/mm ²	152.39	59.60	51.82	88.11	182.80	226.76
铝钢比	2.68	6.14	13.00	7.895	3.79	0.75
直径/mm	30.83	26.80	27.60	36.45	38.50	25.90
重量 /(kg·km ⁻¹)	2 421	1 475.30	1 509.30	2 615	3 349	2 276.5
拉断力/N	361 700	197 550	186 910	293 100	450 290	315 080
破坏应力 /(N·mm ⁻²)	644.80	463.73	413.90	373.96	514.31	792.00
弹性模量 /(N·mm ⁻²)	102 300	76 000	69 000	70 180	83 190	118 800
膨胀系数 ×10 ⁻⁶ /℃	16.70	18.90	19.30	19.50	17.52	13.80
直流电阻 20℃ /(Ω·km ⁻¹)	0.080 5	0.091 7	0.084 1	0.046 11	0.046 3	0.147 3
拉力重量比 /km	15.24	13.65	12.63	11.44	13.72	14.13
资料来源	镇江大胜关 大跨越	国家标准 ^[1]	国家标准 ^[1]	万州长江 大跨越型号	上海中天 铝线厂	上海中天 铝线厂

2.2 允许载流量比较

根据 GB 50545 – 2010^[2], 可以计算得到各种方案允许温度下的允许载流量如表 3 所示。

表 3 6 个导线方案的允许载流量

方案	导线允许温度 /℃	每相允许电流 /A	备 注
方案 1	90	3846	> 2917A
方案 2	90	3279	> 2917A
方案 3	90	3556	> 2917A
方案 4	120	3328	> 2917A
方案 5	120	3386	> 2917A
方案 6	100	3007	> 2917A

根据表 3 的计算结果来看, 6 种方案均能够满足该工程载流量的要求。

2.3 电磁环境比较

采用逐次镜像法计算导线表面电场强度^[3], 采用 CISPR 公式^[4] 计算无线电干扰水平、BPA 公式 计算可听噪声^[5]、前苏联经验公式计算电晕损失。计算对比结果如表 4 所示。

从表 4 的计算结果可知, 6 种方案均满足相关标准^[6]的要求。

表 4 各种导线分裂方式电磁环境参数计算结果

参数	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	标准要求值
子导线分裂间距/mm	550	450	450	600	600	450	
最大地面电场强度/(kV · m ⁻¹)	1.38	1.31	1.29	1.02	1.02	1.31	离地面 1.5 m 高处最大电场强度≤4 kV/m。
电晕临界电场强度 E _{m0} /(kV · cm ⁻¹)	32.84	33.3	32.96	32.29	32.21	33.42	
导线表面最大电场强度有效值 E/(kV · cm ⁻¹)	13.73	15.16	14.43	17.87	17.63	15.60	
导线表面最大电场强度 E _m /(kV · cm ⁻¹)	19.42	21.44	20.99	25.27	25.19	22.06	
E _m /E _{m0}	0.591	0.644	0.637	0.783	0.782	0.66	按电晕条件考虑, 导线最大表面电场强度与全面电晕起始电场强度之比 (E _m /E ₀) ≤0.8 ~ 0.85。
无线电干扰 /dB(μV/m)	34.05	36.56	35.2	52.06	51.71	37.52	无线电干扰限制: 海拔不超过 1000 m 时, 距输电线路边相导线投影外 20 m 处且离地高 2 m、频率为 0.5 MHz 时的无线电干扰不超过 55 dB(V/μm)。
可听噪声 /dB(A)	38.47	40.31	41.3	47.79	47.62	40.98	可听噪音限值: 距边导线投影外 20 m 处, 可听噪音限值小于 55 dB(A)。

注: 表中计算电晕临界电场强度 E_{m0}时光滑系数 m 取值为 0.9。

2.4 电能损失比较

各种导线方案的电能损失列于表 5, 其中年损耗小时数取 3000 h, 上网电价取 0.35 元/kWh。

2.5 铁塔荷载及投资比较

6 种导线方案在考虑大风、覆冰等条件下的铁塔荷载及其投资费用如表 6 所示。其中假设钢材单价 1 万元/t、混凝土单价 0.2 万元/t、导线单价 2 万元/t、金具单价 2.5 万元/t、420 kN 和 550 kN 绝缘子单价分别为 240 元/片和 360 元/片。

通过表 6 的比较可见, 方案 1 的弧垂特性最好, 其跨江直线铁塔高度较方案 2 至方案 6 分别低 8.5 m、6.5 m、22.5 m、3.5 m、2.5 m。按实测大跨越断面图, 4 座铁塔呼高分别为 39 m、63.5 m、61 m、25 m, 铁塔全高分别为 78.5 m、102.1 m、100.6 m、64.55 m。但由于其风荷载、无冰垂直荷重、有冰垂直荷重、最大使用张力均大于其他导线方案, 结合导线、绝缘子、金具等方面因素, 本体投资较方案 2 至方案 6 分别增加 653.8 万元、656 万元、896.28 万元、742.1 万元、114.4 万元。可看出方案 4 本体投

表 5 各方案的电能损失比较

参 数	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
	2 × 1050 MVA(同塔双回)					
每相截面积/mm ²	2243.88	1704.00	1806.16	1567.54	1751.04	1591.32
电流密度/(A · mm ⁻²)	0.65	0.86	0.81	0.93	0.83	0.92
直流电阻/(Ω · km ⁻¹)	0.0805	0.0917	0.0841	0.0461	0.0463	0.1473
电晕损失功率/(kW · km ⁻¹)	1.34	1.40	1.36	2.03	2.05	1.37
电晕损失能耗/(× 10 ⁴ kW · h · km ⁻¹)	1.174	1.226	1.191	1.775	2.059	1.200
电阻损失功率/(kW · km ⁻¹)	278.10	316.88	290.51	328.80	330.20	516.15
电阻损失能耗/(× 10 ⁴ kW · h · km ⁻¹)	83.43	95.06	87.15	98.71	99.12	154.85
总电能损失功率/(kW · km ⁻¹)	279.44	318.28	291.87	330.83	332.25	517.52
总电能损失/(× 10 ⁴ kW · h · km ⁻¹)	84.604	96.286	88.341	100.490	101.180	156.050
总电能损失费用/(万元 · km ⁻¹)	29.61	33.70	30.92	35.17	35.41	54.62
电能损失比较/(万元 · km ⁻¹)	0	+ 4.09	+ 1.31	+ 5.56	+ 5.80	+ 25.01

表 6 铁塔荷载及投资费用

对比项目	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
铝钢比	2.680	6.141	7.710	7.895	3.790	0.750
平均运行应力/% UST	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5
大风水平荷载/(N · m ⁻¹)	117.29	104.44	107.66	71.30	79.49	98.79
比较值/% ^①	100.00	88.95	91.79	60.79	67.77	84.23
垂直荷重(无冰)/(N · m ⁻¹)	92.63	57.00	60.74	51.25	74.97	88.11
比较值/% ^①	100.00	61.54	65.57	55.33	80.94	95.12
垂直荷重(有冰 10 mm)/(N · m ⁻¹)	138.15	104.14	107.35	76.99	105.67	127.57
比较值/% ^①	100.00	75.38	77.71	55.73	76.49	92.34
每相最大张力/kN	578.72	316.08	299.06	234.48	360.23	504.13
比较值/% ^①	100.00	54.62	51.68	40.52	62.25	87.11
跨越塔定位高/m	60.5	69.0	67.0	83.0	64.0	63.0
跨越塔呼称高比较 ^② /m	0	+ 8.5	+ 6.5	+ 22.5	+ 3.5	+ 2.5
铁塔钢材量/t ^②	0	- 396.1	- 402.7	- 559.3	- 494.2	- 63
钢材差价/万元 ^②	0	- 396.1	- 402.7	- 559.3	- 494.2	- 63
基础混凝土量/t ^②	0	- 651	- 664	- 922.4	- 816	- 105
混凝土差价/万元 ^②	0	- 130.2	- 132.8	- 184.48	- 163.2	- 21
导线差价/万元 ^②	0	- 66	- 59	- 77	- 33	- 8
耐张绝缘子串/kN	3 × 550	2 × 550	2 × 550	2 × 420	2 × 550	3 × 550
绝缘子差价/万元 ^②	0	- 27.7	- 27.7	- 36.9	- 27.7	- 13.8
金具差价/万元 ^②	0	- 33.8	- 33.8	- 38.6	- 24.0	- 8.6
本体投资比较/万元 ^②	0	- 653.80	- 656.00	- 896.28	- 742.10	- 114.40

注:①以方案 1 作为基准值进行比较的百分比值;②以方案 1 作为基准值进行比较的差值。

资最低,较方案 1 节约 896. 28 万元。方案 2、方案 4、方案 5 的弧垂特性和电能损失稍差,但其风荷载、无冰垂直荷重、有冰垂直荷重、最大使用张力均较方案 1 小,且以方案 4 的荷重最小。

综上,在满足通航条件下:技术方面,方案 1 可降低跨越塔高,为 6 种方案塔高最低;经济方面,方案 4 可节约本体费用,为 6 种方案费用最低,方案 2、方案 3、方案 5、方案 6 等在塔高和费用方面均介于方案 1 和方案 4 之间,经济技术优势不明显。因此对方案 1 和方案 4 两种导线再进行综合经济技术比较。

3 综合经济技术比较

3.1 年费用最小法

对方案 1、方案 4 按年费用最小法^[7]计算结果如表 7 所示。年运行费用包括年电能损失费、运行维护费率 1.4%、投资回收期 10%。

表 7 两种导线年费用计算结果

年损耗 小时数/h	售电价/ (元·kWh ⁻¹)	方案 1/ (万元·km ⁻¹)	方案 4/ (万元·km ⁻¹)
2500	0.3	168.98	145.41
	0.4	175.01	153.64
3000	0.3	172.60	150.35
	0.4	179.82	160.23
3500	0.3	176.21	155.29
	0.4	184.64	166.81

3.2 综合技术经济比较

两种导线综合技术经济比较见表 8。

表 8 两种导线综合技术经济比较

项 目	方案 1	方案 4
计算跨越塔 定位高/m	60.5	83.0
最大载流能力/A	3846	3328
综合荷载	最大	最小
电磁环境情况	满足要求,有裕度	满足要求,有裕度
金具配套及施工	有配套金具	有配套金具
本体投资差值 /万元 ^①	0	-896.28
年费用差值/万元 ^①	0	-23.57
导线制造情况	国内有制造 运行经验	国内有制造 运行经验

注:①以方案 1 作为比较基准。

通过上述比较,两种方案均能满足输送容量及电磁环境的要求;两种方案均能满足极限载流量 2917 A,方案 4 年费用节约 23.57 万元,优于方案 1。

4 结 论

通过对 6 种不同大跨越导线方案的技术和经济比较分析可知,高强度耐热铝合金导线以其强度高、荷载轻、载流能力强等优点,可以在满足电磁环境要求和保障安全运行的前提下,大幅度降低工程投资。在低海拔地区大跨越工程中具有广泛的应用前景。

参考文献

[1] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 圆线同心绞架空导线引用标准:GB 1179-2008[S],2008.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局. 110~750 kV 架空输电线路设计技术规范:GB 50545-2010[S],2010.

[3] 孙才华,宗伟,李世琼,等. 一种较准确的分裂导线表面场强计算方法[J]. 电网技术,2006,30(4):92-96.

[4] IEEE Radio Noise Subcommittee Report. Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRE/IEEE Survey Results[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System,1973,PAS-92(3):1029-1042.

[5] R. G. Olsen. Radio Noise due to Corona on A Multiconductor Power Line above a Dissipative Earth[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1988,3(1):272-287.

[6] 国家能源局. 110~750 kV 架空输电线路大跨越设计技术规程:DL/T 5485-2013[S],2013.

[7] 原电力工业部. 电力工业部(82)电计字第 44 号文电力工程经济分析暂行条例[R]. 北京:原电力工业部,1982.

作者简介:

罗 强(1965),高级工程师,从事输电线路技术研究及设计工作。

(收稿日期:2018-06-10)

新型一体化五防系统在变电站的应用

江东林,刘青丽,王峥皓,伊永亮,覃天军
(国网四德阳供电公司,四川 德阳 618000)

摘要:在德阳地区各变电站现有五防系统基础上,根据地区电网调度自动化、通信及变电站自动化系统实际情况,提出一种新型的一体化五防系统构架。其以德阳电网监控中心防误数据服务器生成的多层次防误架构为基础,利用变电站现有防误资源,实现防误数据集中统一、站间联络线闭锁、集中/就地开票等功能,完善现有五防系统,提升其可靠性,为地区电网调度控制及变电站安全稳定运行提供可靠保障。

关键词:一体化五防系统;防误闭锁;变电站

中图分类号:TM76 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)06-0080-05

Application of New Five – prevention Integrated System to Substation

Jiang Donglin, Liu Qingli, Wang Zhenghao, Yi Yongliang, Qin Tianjun
(State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract:In order to solve the application defects of the existing anti – misoperation locking system, a new five – prevention integrated system is proposed, which takes the realities of grid dispatching automation system, communication system and substation automation system into account. The five – prevention integrated system has multi – level frame based on anti – misoperation data server which is deployed in dispatching and control center, and then the available anti – misoperation resources in substation are utilized, which can realize the functions such as data processing and storage centralization, anti – misoperation locking of tie – lines, producing operation order in substation or centralized control station. It can improve the existing anti – misoperation locking system, enhance its reliability, and provide a reliable guarantee for the safe and stable operation of regional power grid and substation.

Key words:five – prevention integrated system; anti – misoperation locking; substation

0 引 言

变电站在电力系统中承担电能汇集分配、电压等级转换、负荷投切等重要任务,其可靠运行是电网安全稳定运行的基础。由于变电站接线方式复杂、设备类型众多,且电网企业为减员增效普遍在各电压等级变电站采用集控站运维管理模式,使得运维人员在进行操作时发生电气误操作的风险增加。当发生电气误操作时,可能造成人身伤亡、设备损坏、大面积电网停电。因此,为防止误操作,长期以来,各电压等级变电站均配有防误操作系统。

为防止运行电气设备发生电气误操作事件,原能源部于1990年对电气设备提出明确的“五防”要求^[1],即:1)防止带负荷误拉、误合隔离开关;2)防

止误拉、误合断路器;3)防止带地线或接地开关合闸;4)防止带电挂接地线或合接地开关;5)防止误入带电间隔。国家电力公司于2000年再次明确提出^[2]:采用计算机监控系统时,远方、就地操作,均应具备防误闭锁功能。随着技术的不断发展,五防系统得到不断的发展和完善。文献[3]根据五防系统的技术特点,深入分析了智能变电站中应用五防系统的可行性和必要性,同时给出了一体化五防的应用和网络化间隔五防功能在智能站GOOSE机制中的实现方法。文献[4]提出一种新型在线式五防系统的具体实现方式,包括监控后台、智能操作箱及锁具的实现,对该系统在运行中可能出现的异常提出处理建议。文献[5]以现有防误操作系统五防控制规则为基础,通过采用正向规则,开发可自动生成五防控制规则的专家系统,可避免人工配置五防规

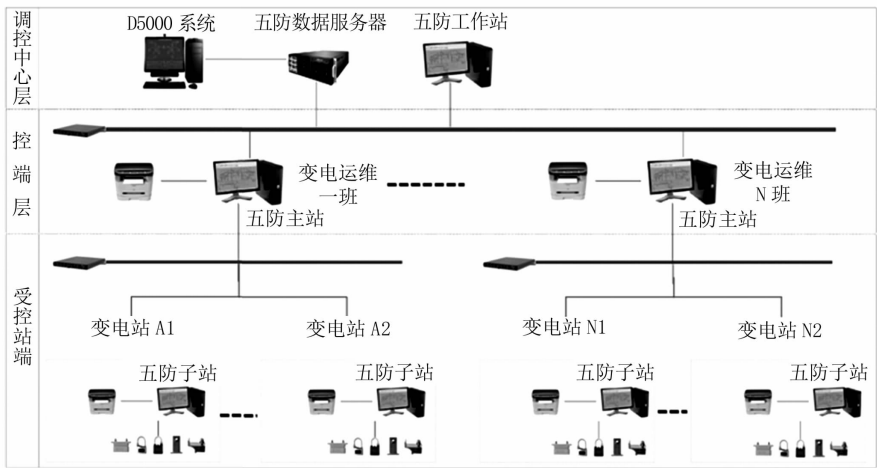


图 1 一体化五防系统结构

则时的正确性降低。文献[6]总结了现有防误操作系统在使用过程中的问题,并对走空程、验电及接地设置等问题提出进一步解决方法。

以德阳电网监控中心防误数据服务器生成的多层次防误架构为基础,利用变电站现有防误资源,实现防误数据集中统一、站间联络线闭锁、集中/就地开票等功能,完善现有五防系统,提升其可靠性,为电网调度控制及变电站安全稳定运行提供可靠保障。

1 一体化网络五防系统设计方案

为解决目前德阳地区变电站已配置离线式五防系统在使用便利性、无法实时获取设备状态等方面的问题,结合调度自动化、通信及变电站自动化系统实际情况,提出在变电站、运维班、调控中心配置新的一体化网络五防系统。

1.1 整体构架

新型一体化五防系统综合离线式及在线式网络五防的优点,整体构架分为调控中心层、控端层和受控站层,结构如图 1 所示。

在调控中心层设置五防系统服务器,对所有数据进行统计、查询管理,可进行操作票出票、倒闸操作预演、操作权管理、遥控操作闭锁等功能;控端层配置有五防主站、电脑钥匙及附件,完成新增变电站的图形编制、数据编制、维护调试等工作;在各受控站配置相对独立的五防规则、虚拟遥信等可根据规则实时自动更新的基础数据。可在各级五防工作站配置系统的维护权,完成权限允许的服务器维护工作。随着受控站数量的

增加或减少,新入网的工作站可通过权限调整设置,实现各层级合理的管理权限。

整个系统软件架构包含 B/S 及 C/S 两种模式,其中 C/S 以 .net 框架为基础,采用 C# 开发;B/S 部分采用 asp.net 开发,数据库为关系型数据库。

系统的整体交互信息包括:D5000 发送一次设备实时状态、遥信变位、遥信全数据、遥控执行申请信息等至五防服务器;五防主站具有五防子站的全部功能,五防子站发送所在变电站的断路器、隔离开关、接地线、接地开关、网门等设备状态信息、当前开出的操作票信息至五防主站,五防主站将上述信息发送至五防服务器,整个五防系统的逻辑判断及数据处理主要在五防数据服务器进行。

五防服务器与调控 D5000 系统采用专用接口程序以 TCP/IP 方式进行信息交互,五防系统服务器与五防主站、五防主站与五防子站间采用已开放的标准规约,利用其自带网口,做 IP 配置就能实现主子站间的防误通信,信息交互如图 2 所示。

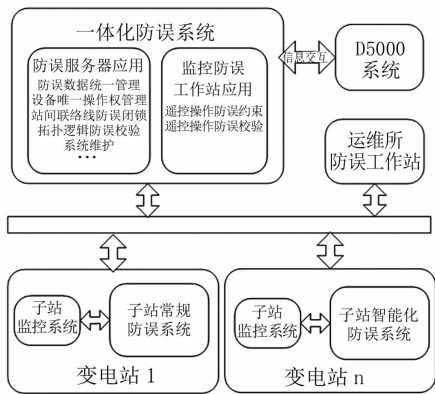


图 2 一体化五防系统信息交互方式

1.2 技术手段

采用现有成熟技术:采用面向对象的软件开发技术和 UML 统一建模语言的思想实现系统的功能要求。

采用数据库结构的技术:支持多种数据库平台的数据交换,保证数据交换的稳定性和准确性。

采用软件集成技术:利用软件的接口技术,实现系统之间的无缝连接和数据交换。

通过图形网络拓扑分析,智能识别线路运行方式,调用联络线对侧设备状态进行防误逻辑判断。

通信技术:利用现有的主子站通信网络,实现主子站防误系统的互联,不需重新添加或更换通信设备。网络通信采用基于现有的 TCP/IP 网络协议。防误系统采用变位信息发送技术,平常没有操作的情况,主子站的通信容量为 0.05 KB/s,有操作的情况下,通信容量与操作内容的项数有关,最多不超过 1 KB/s。

主子站通信协议:服务器系统支持不同五防厂家变电站的接入,通信协议采用部颁标准规约。

1.3 系统特点

1)实用性:五防服务器属系统核心设备,管理所有受控端站五防数据,并提供五防服务功能。即便受控站与五防服务器通信中断,其也具备独立运行的功能。

2)安全性:五防服务器本身融合操作权限管理等设备防误闭锁方面的所有功能,可完整独立地实现设备防误功能。

3)可维护性:系统可灵活配置,鉴于系统规划为多层级结构,涉及调试、维护及系统升级方面较方便。

4)兼容性:系统通过优特开放式通讯规约,实现与国内主流微机防误厂家系统的连接,不仅能够实现遥信共享,更能实现操作票的网络传输,方便实现主站开票、子站操作及子站直接向主站申请开票操作的运行操作方式。

5)数据全面共享:系统遵循 IEC 61850 标准,可与其他系统交互数据及状态,也可为其他系统提供所需要的数据和状态,提供实时防误闭锁服务,并能够与其他系统互联,实现数据及状态信息的全面共享。

6)异构数据的兼容性:针对不同综自厂家和防误系统,可以针对不同的系统进行抽象建模,模型可以包容全部的重要信息和内部逻辑关系,保证信息的无遗漏传输。

1.4 五防控制规则

五防系统控制规则按原理可分为基于正向控制

式和基于闭锁式两类。但在实施过程中涉及综自系统时,如果采用闭锁规则,无论利用脚本或标准规则库,语句实现的复杂度都大于正向控制规则;此外,正向控制规则更便于五防、综自系统技术人员进行核查;因此,一体化五防系统采用目前各主流综合自动化厂家和五防厂家采用的正向控制规则。

如图 3,以典型 220 kV 线路间隔为例,基于正向控制的五防控制规则如下:

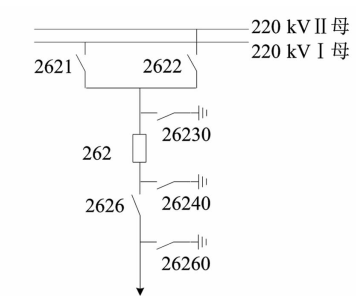


图 3 典型 220 kV 线路间隔接线

- 1)断路器 262 控制规则,分闸/合闸条件:无。
- 2)2621 (2622) 隔离开关控制规则,分闸条件:
 - ①262 断路器分闸、2622 (2621) 隔离开关分闸;
 - ②2622 (2621) 隔离开关合闸、母联断路器及其两侧隔离开关合闸。合闸条件:①2622 (2621) 隔离开关分闸、262 断路器分闸、26230 及 26240 接地开关分闸;
 - ②2622 (2621) 隔离开关合闸,母联断路器及其两侧隔离开关合闸。
- 3)2626 隔离开关控制规则,分闸条件:262 断路器分闸。合闸条件:262 断路器分闸、26230 接地开关分闸、26240 接地开关分闸、26260 接地开关分闸。
- 4)26230 (26240) 接地开关控制规则,分闸条件:无。合闸条件:2621 隔离开关分闸、2622 隔离开关分闸、2626 隔离开关分闸。
- 5)26260 接地开关控制规则,分闸条件:无。合闸条件:2626 隔离开关分闸,出线线路无电压。

在此基础上,分类对断路器、隔离开关、接地开关、主变压器及各侧断路器等设备的典型五防控制规则进行分析,并由此建立典型五防控制规则库。再根据一次设备主接线图建立的节点支路模型,结合图论知识以及确定的原则自动生成一体化五防系统的详细五防控制规则。

1.5 系统功能

1) 调控中心防误功能:将调控 D5000 系统对变电设备的遥控操作纳入防误管理范畴,远方操作时,需由 D5000 系统首先向网络五防服务器发送操作

请求指令,五防服务器根据请求指令,结合已抽取的设备运行方式判断五防操作正确性,当五防校验不会发生误操作时,网络五防系统给监控系统发送允许操作指令,监控系统接到指令后操作实际设备,为运维班模式下各变电站提供进一步防误安全保障。

2) 跨站防误闭锁:实现变电站与变电站之间的闭锁功能,杜绝多变电站同时操作时,线路带电情况下合出线侧接地刀闸的安全隐患。

3) 倒闸操作票网络传输和远程审核:运维人员可在五防主站进行模拟预演,上传至五防服务器通过审核后,开出操作票并通过网络发送至任一五防子站,在子站接收后进行操作;也可在任一五防子站进行模拟预演,通过远程审核后,开出操作票,接收操作任务进行操作。

4) 操作灵活性:五防系统可实现在五防主站及子站开具操作票,进行操作;同样可在五防主站或任意五防子站回传操作记录,遇有临时操作任务时,可通过远程开操作票、网络传输操作票,进行操作任务的追加,具有更好灵活性。

5) 远程维护:当需要对变电站防误数据进行维护时,无需在变电站进行维护,调控中心工作站可实现对五防系统内任一变电站防误数据远程维护工作,避免维护滞后性,降低数据更新备份工作量。

6) 设备状态对位功能:五防主/子站显示的一次设备状态采用与调控 D5000 系统接口通讯实时对位(如电动操作设备),其他非电动操作设备、人工装设接地线等监控系统未采集遥信状态的设备,则通过记忆设备最近的准确运行状态来实现。

7) 系统具备唯一操作权功能:保证同一时间断面对某设备只有一个点位防误系统可进行倒闸操作。当 D5000 系统进行操作时,自动闭锁五防主/子站的操作权限;当主/子站防误主机操作时,自动闭锁 D5000 系统操作权限。

8) 多任务并行、分组操作:解决多组并行操作任务的相互闭锁问题。当前模拟预演操作只要不与当前的操作设备交叉重叠,即可操作。

2 一体化五防系统实现方式

现有变电站均通过调度数据专网接入调控中心 D5000 系统服务器。通过调度专用数据网(光端机)分出一个站间带宽不小于 2 Mb/s(每秒下载速度不少于

300 KB/s)的局域网通道接口给网络五防系统使用,使网络五防服务器与控端五防主站、所辖各变电站五防子站组成局域网络,网络结构图如图 4 所示。

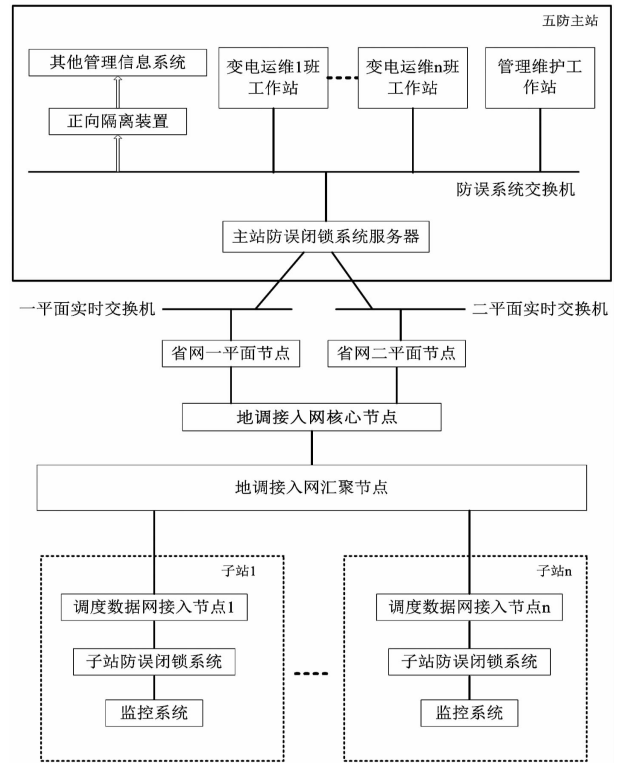


图 4 网络结构

2.1 防误系统互联功能实现

凡满足通信规约标准的防误主/子站均可接入本五防系统。当五防主/子站与五防服务器接口时,选用以太网通道连接,接口及过程中,仅需在网络五防主站系统完成新增变电站的图形编制、数据编制及调试等工作,将控端的防误系统进行主子站通讯调试,即可完成五防主/子站的接入工作。

2.2 D5000 通讯方式及未采集设备状态对位实现

1) 组网模式

D5000 系统通过 RTU 与防误主站通讯,系统通过 RTU 向防误系统发送设备状态,并从 RTU 获取防误系统的解锁与闭锁信息,详见图 5。

2) 与 D5000 通讯方式

通讯规约:上下行均基于 IEC104 规约,分别负责五防系统至 D5000 发送遥控许可信息,D5000 至五防系统发送实时位置遥信。

传输方式:以 D5000 作为传输始端,D5000 接收原始报文后,经规约转换,将遥信变位及全数据发至五防系统,五防系统将遥控许可信息通过上行通道发至 D5000。

五防系统接收的遥信点号、发送的遥控许可点号可单独配置,要求发送的遥控许可点号在整个集控站中唯一。接收遥信按厂站的方式接收,发送的遥控许可点号按照整包全数据的方式。增加检查项,在一个厂站接收的遥信,遥信点号不能重复,发送的遥控许可点号在整个集控站中不能重复。

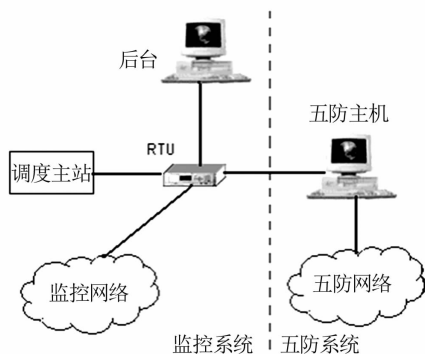


图 5 D5000 与一体化五防组网模式

3) D5000 未采集设备状态对位实现

倒闸操作完毕后电脑钥匙插回传送座,五防子站根据电脑钥匙回传信息通过记忆方式将 D5000 系统未采集的设备(如手动操作设备、临时接地线等)状态反馈给五防主站,五防主站将上述信息回传五防服务器,五防服务器将设备状态更新,运维人员也可持电脑钥匙直接回到控端五防主站进行信息回传。

2.3 网络安全

1) 安全认证:前置模块向厂站系统下发的控制类报文在安全网关机或者纵向加密装置建立的安全隧道中传送,确保控制报文在调度数据网中传送的安全性、可靠性。

2) 数据加密:系统除具备纵向加密装置采用的 RSA 加密算法外,还在应用层数据交互中采用 CRC 循环冗余校验机制。

3) 系统认证:终端设备与系统通信前先进行设备 ID 及 IP 地址双向认证,认证通过才能进行数据通信。

4) 安全加固:对系统主机的账户口令、网络服务、数据访问控制、数据库系统等采取安全加固措施。

2.4 系统其他关键功能

一体化五防系统还具有一些辅助功能,给人员培训及系统维护带来便利性。

1) 模拟操作及仿真培训功能

控端五防主站及受控站层五防子站均具有专门

的培训模块:可选择自己管辖范围内相应站图形,进行带五防逻辑判断的图形模拟预演操作;检验倒闸操作票,同时对形成的操作票保存,满足分层管理。

2) 工作站系统维护功能

通过配置在调控中心的五防工作站,维护人员可利用系统自带的辅助工具软件对所有数据进行维护。包括与设备新增及设备异动相关的图形绘制、基础数据录入、批量修改、防误规则写入、锁码采集及测试等功能,增加维护便利性,同时降低数据更新备份工作量。

3) 黑匣子功能

整个一体化五防系统内所有五防主/子站、电脑钥匙均具备黑匣子功能,即:系统对全时段所有倒闸操作情况进行记录,包括各操作任务的已/未执行项及时间、异常操作等详细信息;并可按操作类型、电压等级、操作时间等任意定制关键字对记录数据进行查寻、调阅;记录在电脑钥匙中的信息可调阅但无法删除;最大记录项数 2000 项,掉电记忆达 5 年。系统提供将所需数据根据可调模板制作电子数据并打印。

3 一体化五防系统在德阳电网的应用

目前,根据德阳地区变电站软硬件配置实际情况,在国网德阳供电公司所辖城区、广汉两个片区,共计 27 座变电站(含 6 座 220 kV 变电站,21 座 110 kV 变电站)建成一体化五防系统,实现了防误数据集中统一、集中/就地开票等功能,有效提高倒闸操作和事故、异常处理的效率,防止误操作事故的发生,为变电站安全运维提供技术保障。下一步,计划在调控端建设完善 D5000 系统中的五防功能,并实现站间联络线闭锁功能,有效防止防误调度事故发生。

4 结 语

未来,随着变电站通信、综合自动化以及智能变电站相关技术的不断成熟,综合了离线式及在线式五防系统优点的一体化网络五防系统必定是防误系统的发展方向,它将作为变电运维专业防止误操作事故、调控专业防止误调度事故发生的有效技防措施。

(下转第 88 页)

300 MW 汽轮机汽封改造及启动振动控制实践

晏红兵, 刘勇军

(国电深能四川华蓥山发电有限公司, 四川 达州 635214)

摘要:国电深能四川华蓥山发电有限公司 31 号汽轮机汽封改造后, 为保证汽封改造效果, 详细分析了汽封间隙对机组振动的影响, 提出了机组在升速过程中以及运行中的振动控制措施, 有力地确保了机组的顺利启动和带负荷, 有效地提高了机组的经济性, 同时所提出的启动经验可供同类型机组参考。

关键词:汽轮机; 汽封间隙; 机组振动; 控制措施; 经济性

中图分类号:TK263.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)06-0085-04

Practice of Steam Seal Transformation and Turbine Start – up Vibration Control of 300 MW Steam Turbine

Yan Hongbing, Liu Yongjun

(Guodian Shenneng Sichuan Huayingshan Power Generation Co., Ltd.,
Dazhou 635214, Sichuan, China)

Abstract:In order to ensure the effect of steam seal transformation of No. 31 steam turbine of Sichuan Huayingshan Power Generation Co., Ltd., the influence of steam seal clearance on the vibration of steam turbine is analyzed in detail, and the vibration control measurements during speed – up and operation are put forward, which effectively ensures the smooth start – up and on – load of the unit. The economical efficiency of this unit is improved effectively, and the start – up experience can also be referred to the unit of the same type.

Key words:steam turbine; steam seal clearance; unit vibration; control measurement; economical efficiency

0 引言

按照《国家煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020 年)》要求, 现役燃煤发电机组 2020 年平均供电煤耗应低于 310 g/kWh^[1]。汽封性能对机组的经济性和可靠性有着重要的影响。为降低漏汽损失, 提高机组安全性和经济性, 采用先进汽封技术对原有的传统汽封进行改造是十分必要的^[2]。采用新型汽封对汽轮机轴端汽封和通流部分汽封进行改造, 可以达到降低汽轮机轴端和通流部分的漏汽量, 提高汽轮机效率的目的^[3]。但由于调整汽封间隙过小, 机组启动常伴随轴振偏大甚至超限, 或汽封磨损过大影响节能效果, 甚至出现多次开机失败再次揭缸调整的问题。某 300 MW 机组结合大修进行了节能升级汽封改造, 通过合理选择汽封间隙值, 针对性地细化启动防

振专项措施, 机组启动顺利、改造效果良好。

1 机组概况

某型号为 N300 – 16.7/537/537 – 8 的 300 MW 机组于 2006 年 3 月投产。机组有 3 个临界转速, 分别为 1370 r/min、1688 r/min、1750 r/min。该机组于 2017 年 9 月大修时配套进行节能升级改造, 更换了高中压缸隔板汽封、高中压缸前后汽封、高中压缸过桥汽封, 所有汽封间隙全部按技术规范下限调整。

2 汽封改造

2.1 高中压缸汽封调整方案

该机组汽封 2010 年进行了 1 次改造, 高中压缸叶顶汽封改造为可退让式汽封; 高中压缸隔板汽封、

前后轴封、高中压间(过桥)汽封改造为铁素体刀齿蜂窝汽封和铁素体接触式蜂窝汽封。2016年机组揭缸检查发现汽封已磨损严重,调节余量难以满足要求,为适应节能技术的进步、提升机组性能,本次A修决定将高中压缸隔板汽封、前后轴封、高中压间(过桥)汽封、高中压缸叶顶汽封全部进行了更换。经招标,选用汽封结构形式为铁素体汽封和铁素体接触式汽封。

汽封间隙调整是汽封改造的关键,为保证改造效果,所有间隙均取设计值、前次改造值的下限。鉴于本次大修时,解体发现所有下部汽封磨损较为严重,而高中压隔板及轴封上部汽封均完好,故决定将上部汽封的间隙值在上述数值上再降低0.2 mm。

2.2 低压缸汽封调整方案

低压隔板汽封及轴封2010年A修时改造为铁素体刀齿蜂窝汽封和铁素体接触式蜂窝汽封,叶顶正反1~4级汽封2012年B修时改造为刷式汽封,叶顶正反5、6级汽封是蜂窝汽封。本次A修解体中发现低压缸隔板汽封及轴封下部磨损严重,叶顶刷式汽封的毛刷脱落较多,叶顶正反5、6级蜂窝汽封水蚀严重,正反第1~3级转子轴磨损严重;低压隔板及轴封上部汽封均完好,没有磨损现象。

改造低压隔板汽封及轴封为铁素体汽封和铁素体接触式汽封,叶顶正反1~4级汽封为可退让式汽封,叶顶正反5、6级汽封还是采用蜂窝汽封。所有间隙均按厂家设计值下限调整。

2.3 汽封间隙调整后的验收

本次A修时,采用全实缸压间隙进行调整、验收汽封间隙,总共进行4次。每次施工方、监理方、业主方均到场验收,保证了施工质量。

3 汽封改造后启动

3.1 启动前的准备

由于本次A修汽封间隙调整得较小,为使启动过程磨擦可控在控,启动委员会组织检修、运行人员进行技术交底、方案措施讨论、编制专项控制方案,并邀请科学院专家到场监测、指导。

3.2 控制措施

3.2.1 控制原则

汽封间隙调整到较小值,启动时会发生动静部分磨擦。为确保技改效果,防止摩擦过度引起设备

损伤,控制遵循以下原则:1)尽量消除非汽封间隙小引起磨擦,确保汽缸、转子等均匀膨胀,充分膨胀,机组的各部分热应力、热变形、转子与汽缸的胀差以及转动部分的振动在允许范围内;2)如暖机过程任意轴振超过160 μm 且热膨胀缓慢未达到历史经验值,则适时打闸,打闸后使转子尽快静止,闷缸加热缸体,减少胀差;3)再次启动时,必须保证大轴弯曲值、盘车电流等回到原始值。

3.2.2 选择合理的冲转参数

制造厂规定汽轮机冷态高中压缸联合启动冲转主蒸汽压力为3.45 MPa,主蒸汽温度为320 $^{\circ}\text{C}$,再热蒸汽温为237 $^{\circ}\text{C}$,再热蒸汽压为0.686 MPa,根据启动经验,在该冲转参数时调速汽门开度过小不利于汽轮机加热,对于无启动锅炉的首台机组启动轴封,供汽温度过高,轴颈加热过于剧烈,大轴膨胀快于汽缸,在汽封间隙小的情况下易产生碰磨造成振动。因此冲转参数优化如下:

1)蒸汽温度与金属温度相匹配,要求放热系数 α 要小一些;

2)蒸汽的过热度不小于50 $^{\circ}\text{C}$;

3)再热蒸汽参数的选择为过热度不小于50 $^{\circ}\text{C}$,如高中压为合缸布置,再热蒸汽与主蒸汽温度相差不大于30 $^{\circ}\text{C}$ 。

本次机组A修后各部金属温度均为常温,冲转参数选择为低压微过热蒸汽,主蒸汽压力1.0 MPa,主蒸汽温度260 $^{\circ}\text{C}$ ~270 $^{\circ}\text{C}$,再热蒸汽压力0.2 MPa,再热蒸汽温度240 $^{\circ}\text{C}$ ~250 $^{\circ}\text{C}$;汽轮机转速1200 r/min后逐渐提升主蒸汽压力到1.5 MPa,主蒸汽温度300 $^{\circ}\text{C}$,汽轮机转速2000 r/min后逐渐提升主蒸汽压力到2.0 MPa,主蒸汽温度320 $^{\circ}\text{C}$ 。并列后按照升温升压曲线提升温度压力,每提升30 $^{\circ}\text{C}$ 汽温稳定10 min。采用低压微过热蒸汽冲转,单阀模式汽轮机调速汽门开度达到10%,汽轮机缸内蒸汽充盈度较好,加热较为均匀。在保证汽缸蒸汽充盈度的情况下分段提升主蒸汽参数,既保证过临界转速需要的蒸汽参数,又控制了汽轮机的加热速度和均匀度。

3.2.3 及时投入汽缸夹层加热

夹层加热系统的投入减少机组启动时间,降低上下缸温差,改善机组启动条件,有效避免因加热膨胀不均可能发生的碰磨引起振动。锅炉点火起压后,炉侧压力为0.2~0.5 MPa,凝汽器建立真空后稍开联箱进汽门,维持联箱压力0.1~0.3 MPa,对汽

1) 汽轮机启动前 48 h 投入连续盘车进行直轴。选择升速率 100 r/min^2 , 冲转到 500 r/min 暖机 5 min 进行摩擦检查。

3.2.4 保持合理的凝汽器真空度

冷态开机时,机组真空过高则冲转时主蒸汽流量小,不利于暖机和汽缸膨胀;过低则在汽缸进汽时容易发生真空突降甚至低压缸顶部安全阀爆破。正常情况冷态开机时凝汽器背压维持在 14 kPa 以上。该 300 MW 机组 3 号、4 号轴承座均设于低压缸基础上,排汽温度过高和过低都会造成汽缸向上或向下膨胀,带动转子中心上移,会诱发机组轴系振动。保持凝汽器背压在 20 ~ 30 kPa,增加汽轮机进汽量,汽缸蒸汽充盈度较好,汽缸加热均匀。按照冷态启动先抽真空后送轴封供汽要求,启动 1 台水环真空泵建立凝汽器真空,通过凝汽器真空破坏门控制凝汽器背压在 20 ~ 30 kPa,排汽温度控制在 55 ~ 60 ℃。

3.2.5 及时切换轴封汽源

该厂两台 300 MW 机组均未设置启动锅炉,机组轴封供汽汽源由主蒸汽至轴封供汽、顶棚过热器由吹灰蒸汽管道经辅助蒸汽母管至轴封供汽、冷再热器至轴封供汽三路汽源组成。轴封供汽由主蒸汽供给时,因轴封供汽减温减压器设于低压轴封供汽管道,高中压轴封处温度等于主蒸汽温度,高中压轴颈加热较快,在汽封间隙较小的情况下,易出现碰磨产生振动。轴封供汽为锅炉顶棚过热器由吹灰蒸汽管道经辅助蒸汽母管供汽时,该管道随锅炉点火升温进行暖管疏水,主蒸汽压力 0.5 MPa、温度 150℃~160℃,投入高温汽源向轴封供汽。辅汽联箱压力大于 0.1 MPa 时,投入低温汽源联合向轴封供汽,防止高中压缸轴封温度过高造成汽封膨胀过快。再热蒸汽压力大于 1.0 MPa 时,投入冷却再热器至轴封供汽,轴封高温汽源热备用。有效地防止升温升压对高中压转子轴封处轴颈的过度加热,避免碰磨产生振动。

3.2.6 升速率及暖机点的选择与控制

汽轮机整个启动过程就是一个缓慢均匀的加热过程,各部温差及膨胀不正常的情况下就容易发生碰磨产生振动,升速率及暖机点的选择和控制在至关重要。本次汽封更换间隙调整后,除临界转速区以外,升速率及机组带负荷速度均应比正常启动缓慢,以便汽轮机加热和汽封磨合,通过胀差、汽缸膨胀、各部温度综合判断暖机效果及汽封磨合状况,再决定升速或

2) 摩擦检查结束选择升速率 100 r/min^2 , 每升速 100 r 停留直轴磨合 10 min , 待胀差、振动、汽缸温度等各参数无异常, 继续升速至 1200 r/min , 中速暖机 60 min 。

3) 中速暖机结束,检查胀差、振动、汽缸温度等各参数无异常,高压内缸内壁温度大于 200 ℃,汽缸热膨胀大于 5 mm。选择升速率 100 r/min²,机组过临界升速率自动变化为 400 r/min²,升速至 2000 r/min,高速暖机 60 min。

4) 高速暖机结束, 高压内缸上半内壁调节级后金属温度大于 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 高、中压缸热膨胀大于 7 mm , 高、中压胀差小于 3.5 mm 并趋于稳定, TSI 其余各参数在允许范围内。升速率 100 r/min^2 , 升速至 3000 r/min 。

5)空负荷暖机 60 min 后,发电机并列。

6)并网后选择 1 MW/min 升速率提升负荷至 10 MW,暖机 2 h。

7) 根据高、中压缸胀差、振动、热膨胀及各部金属温度情况每暖机 1~2 h 提升负荷 10 MW。

3.2.7 控制温差

保证各管道疏水及汽缸疏水全开,严格控制上、下缸温差及汽缸各部温差在运行范围内。

3.2.8 汽轮机轴振大打闸“闷缸”的监视及判断

汽轮机因汽封间隙小发生碰磨产生振动,打闸后振动还有一个上升过程,为保证汽封更换改造效果,降低汽轮机热耗,启动中汽轮机轴振峰值控制在 $160\text{ }\mu\text{m}$,大轴振动超过 $160\text{ }\mu\text{m}$ 即打闸停机。从 A 修后的首次启动至机组带 300 MW 负荷阶段共打闸 6 次。打闸原因均是轴承振动大,打闸后破坏真空使转子尽快静止。打闸后闷缸时间 4 h ,监视盘车电流、汽缸各部温度正常,待大轴弯曲值回到原始值后方进行再次启动。

3.3 启动过程

A 修完毕,系统分部试转正常,投入汽轮机连续盘车进行直轴,观察盘车电流,记录大轴弯曲原始值。机组从初次启动到完全正常并网共打闸 6 次。前 3 次启动为保证汽封间隙调整效果,打闸振动值控制较小,后 3 次因机组已并列运行打闸值有所放大,但均在允许范围内,打闸后破坏凝汽器真空,使

转子尽快静止。经不断摸索优化,机组最终加至满负荷,且各轴承振动值均在 70 μm 以下,具体参数见表 1。

表 1 启动次数及振动打闸值

启动次数	转速或负荷	最大轴振	轴振值/ μm	惰走时最高 振动值/ μm	惰走时间/ min
第 1 次	1000 r/min	3X	139	180	11
第 2 次	800 r/min	3Y	135	175	10
第 3 次	900 r/min	3X	79	147	13
第 4 次	20 MW	3X	180	241	57
第 5 次	45 MW	2X	125	237	60
第 6 次	190 MW	2X	240	347	51
满负荷	300 MW	4X	49		

4 改造前后节能效果分析

国电科学技术研究院有限公司成都分公司根据 ASME PTC - 2004《汽轮机热力性能验收试验规程》对 31 号机组进行改造前后的性能验收试验,在额定工况下汽机热耗率降低了约 130 kJ/kWh,供电煤耗降低了约 5.0 g/kWh,同时机组的高、中、低压缸效率均有一定程度的提高,取得了非常明显的节能效果,详见表 2。

表 2 改造前后汽轮机缸效率

名称	设计值	改造前	改造后	提高
高压缸效率/%	84.91	82.95	83.15	0.201
中压缸效率/%	92.28	89.81	91.91	2.09
低压缸效率 (UEEP)/%	90.63	85.355	86.65	1.296

(上接第 84 页)

参考文献

[1] 能源部. 防止电气误操作装置管理规定[L]. 能源安保(1990)1110 号,1991.

[2] 国家电力公司. 防止电力生产重大事故的二十五项重点要求[L]. 国电发(2000)589 号,2000.

[3] 智全中,秦广召,娄伟,等. 五防系统在智能化变电站中应用分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(23): 108 - 111.

[4] 胡巨,陈宏辉. 一种新型的变电站在线式五防系统给的实

5 结 语

通过采用新型汽封以及安装过程中对汽封间隙的严格控制,降低了汽缸内漏汽损失,有效地提高了机组安全性和经济性,节能效果显著。同时通过对冲转参数的调整、汽轮机背压控制、升速率控制、轴封供汽温度调整、有计划闷缸暖机等措施,保证了汽封改造及间隙优化后启动顺畅,达到预期目的。通过本次启动,得出以下实践经验:

- 1)充分暖机,保证各部加热均匀。用常规启动方式适当延长暖机时间达不到暖机效果,背压宜在 20 kPa 以上,以增大进汽量。启动时,发生了提升转速及负荷稍快、凝汽器真空控制过高暖机流量不足等原因引起的打闸。
- 2)合理控制轴封供汽温度。投入低温汽源时间越早越好,避免轴颈及汽封过度加热膨胀发生碰磨。
- 3)提升转速及负荷需缓慢,使各部汽封充分磨合。

参考文献

[1] 中华人民共和国发展和改革委员会. 煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020 年)[C]. 2014.

[2] 宁哲,赵毅,王生鹏. 采用先进汽封技术提高汽轮机效率[J]. 热力透平,2009(1):15 - 17.

[3] 王学栋,吴丽曼,郝玉振. 汽轮机汽封改造对经济指标和振动影响的测试分析[J]. 山东电力技术,2014,41(3):64 - 68.

作者简介:

晏红兵(1971),助理工程师,长期从事火力发电厂集控运行技术管理工作;

刘勇军(1979),助理工程师,长期从事火力发电厂汽机运行技术管理工作。(收稿日期:2018 - 08 - 24)

现[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(19):118 - 121.

[5] 余南华,黄曙,李先波,等. 变电站五防控制规则自动生成技术思路[J]. 电力系统自动化,2010,34(17):97 - 99.

[6] 梁若文,胡国新,周炎. 微机五防装置使用中应注意的问题与不足[J]. 高电压技术,2005,31(8):79 - 80.

作者简介:

江东林(1986),工程师,研究方向为电力系统分析计算与稳定控制;

刘青丽(1977),高级工程师,研究方向为电力系统运行;

王峥皓(1989),工程师,研究方向为电力系统运行。(收稿日期:2018 - 08 - 24)

一起 GIS 断路器合闸机械特性异常原因分析

刘继午,熊 攀,肖 茂,袁国森
(国网泸州供电公司,四川 泸州 646000)

摘 要:针对某变电站 220 kV GIS 断路器合闸时间及不同期时间严重超标、合闸速度偏低问题,通过对设备异常现象进行剖析,结合现场验证,准确找到 GIS 断路器合闸机械特性异常原因;同时,根据现场实践经验,提出了运维检修预防性措施,为类似结构 GIS 断路器的运行维护提供参考。

关键词:GIS;断路器;机械特性

中图分类号:TM595 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)06-0089-03

Cause Analysis on Abnormal Mechanical Characteristics of Closing Operation of A GIS Circuit – breaker

Liu Jiwu, Xiong Pan, Xiao Mao, Yuan Guosen
(State Grid Luzhou electric Power Supply Company, Luzhou 646000, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the problems that the closing time and asynchronization time are seriously exceeded the standard and the low closing speed of a 220 kV GIS circuit – breaker in a substation, through the analysis of the failure phenomenon and the field verification, the abnormal reasons of mechanical characteristics of GIS circuit – breaker are found out accurately. Meanwhile, based on the field experiences, the preventive measures for operation and maintenance are put forward, which provides a reference for the operation and maintenance of similar GIS circuit – breakers.

Key words: GIS; circuit – breaker; mechanical characteristics

0 引 言

气体绝缘封闭式组合电器(gas insulated switchgear, GIS)因结构紧凑、占地面积小、可靠性高、检修维护工作量少等优点,被广泛应用于中国电力系统^[1]。断路器因具有灭弧功能,能够关合、开断正常负荷电流及故障大电流,是保证 GIS 安全正常运行的关键设备。断路器操作机构作为断路器核心部件之一,是保证断路器正常开断、分合运行及故障电流的关键。该部件的可靠动作是保证断路器正常运行,保证电网设备安全、供电可靠的重要基础^[2]。

断路器合闸不同期时间是断路器机械特性参数之一,表示的是断路器三相合闸动作时间差的最大值^[3],具有严格的厂家技术标准要求,合闸不同期时间过大,将会导致断路器动静触头间产生过电压,严重时将引起断路器的爆炸。

下面对某 220 kV GIS 断路器合闸时间、合闸不同期时间严重超标、合闸速度偏低缺陷案例进行分析,排查、核实测试数据异常原因,并总结类似断路器操作机构检修经验,为提升断路器安装、验收、运维质量提供参考。

1 案例概述

某站 220 kV 出线 GIS 断路器型号为 LW24-252,操作机构型号为 CT20-IV,分相弹簧操作机构,于 2014 年 10 月投运。2017 年 7 月,在对该断路器进行例行试验过程中,发现该断路器机械特性测试数据异常,测试所使用的机械特性测试仪型号为 GKC433E。测试数据如表 1 所示,从表中可以看出该断路器 C 相合闸时间刚好满足标准要求,但 A、B 两相合闸时间分别比标准上限大 22.00%、26.55%,明显偏大;合闸速度偏低,合闸不同期时间达 28.2 ms,

严重超过厂家技术标准要求的“ $\leq 4\text{ ms}$ ”,是标准上限值的7.05 倍。

表 1 断路器机械特性测试数据 1				
测试参数	标准	A	B	C
合闸时间/ms	80 ~ 110	134.2	139.2	110.0
合闸同期/ms	≤ 4	28.2		
合闸速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.9 ~ 3.6	2.32	2.15	2.46

同时,该断路器的机械特性测试曲线如图 1 所示,从机械特性曲线图中未发现明显异常。

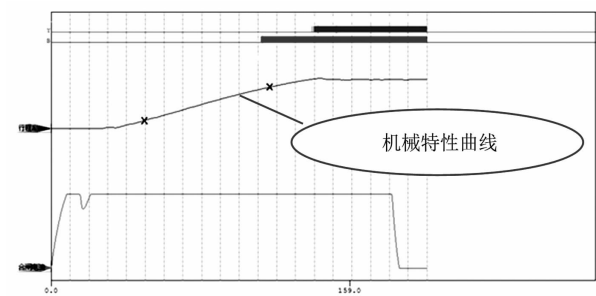


图 1 例行试验断路器机械特性测试曲线

2 缺陷原因分析

2.1 缺陷原因排查

现场首先对断路器操作机构外观进行了初步检查,并未发现明显异常现象。

为了排除测试仪器误差导致的测试数据异常,使用了另一套同型号、同生产厂家的机械特性测试仪进行数据对比。经过对比,测试数据仍与初次测试结果相似,证实该断路器本身存在缺陷。

通过对测试数据的初步分析,认为断路器合闸弹簧疲软是造成断路器合闸时间及合闸不同期时间严重超标、合闸速度偏低的主要原因。因此,现场对断路器合闸弹簧压缩量进行了调试,通过增加弹簧压缩量,提升弹簧储存能量,增大断路器合闸能量,从而降低断路器合闸时间及合闸不同期时间,达到提升断路器合闸速度的目的。

表 2 断路器机械特性测试数据 2				
测试参数	标准	A	B	C
合闸时间/ms	80 ~ 110	100.5	101.5	98.1
合闸同期/ms	≤ 4	3.4		
合闸速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.9 ~ 3.6	2.35	2.36	2.54

对断路器合闸弹簧压缩量调节后,再次进行机械特性测试时,发现断路器合闸时间及合闸不同期时间皆满足厂家技术标准要求,测试数据如表 2 所示。断路器机械特性曲线也无异常,如图 2 所示。

但是,断路器三相合闸速度却始终低于厂家技术标准要求的 $2.9 \sim 3.6\text{ m/s}$ 。

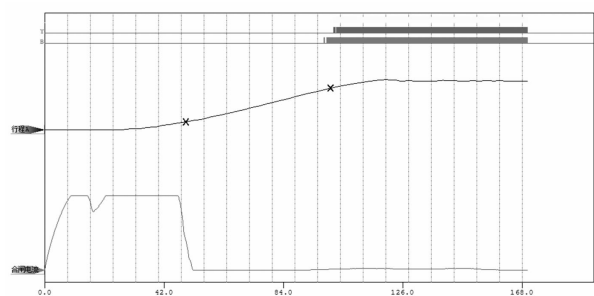


图 2 调节弹簧压缩量后断路器机械特性曲线
经过反复分析及现场排查,发现该断路器垂直连杆上附着一层黑色物质,如图 3 所示。



图 3 断路器垂直连杆上的黑色物质

经过分析,怀疑断路器垂直连杆与连杆轴套密封件之间存在机械磨损,磨损引起断路器合闸操作时存在机械卡涩,从而造成断路器合闸时间严重超标,断路器合闸速度偏低。同时,由于断路器三相机机械磨损程度不同以及机械磨损对断路器机械特性影响的随机性,使得断路器三相的合闸时间差别较大,致使断路器合闸不同期时间严重超标。

为了证实推测的正确性,对断路器轴密封件进行了解体检查,现场检查照片如图 4 及图 5 所示。从图中可以看到更多由黑色密封件产生的黑色颗粒物附着在断路器垂直连杆及密封件处。

在现场对断路器垂直连杆进行了清洗、润滑,并更换整套垂直连杆轴密封件。随后,对断路器机械特性参数进行了重新测量,测试数据如表 3 所示,机械特性曲线如图 6 所示。从测试数据看出,检修以后,该断路器的机械特性参数皆满足厂家技术标准要求。

表 3 断路器机械特性测试数据 3				
测试参数	标准	A	B	C
合闸时间/ms	80 ~ 110	94.1	96.9	96.9
合闸同期/ms	≤ 4	2.8		
合闸速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.9 ~ 3.6	3.31	3.28	3.29

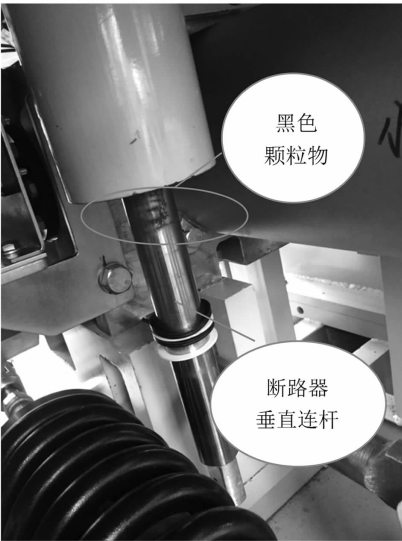


图 4 断路器垂直连杆上附着的黑色颗粒物



图 5 断路器垂直连杆轴密封件上的颗粒物

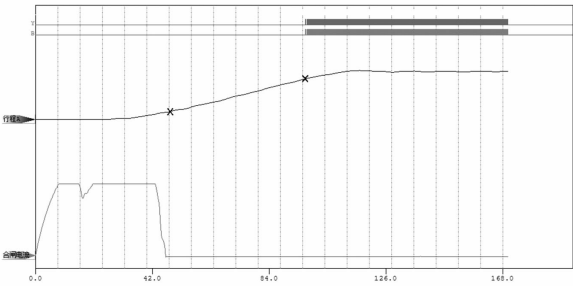


图 6 垂直连杆处理后断路器机械特性曲线

2.2 原因分析

断路器垂直连杆与连杆轴套密封件之间存在机械磨损,是造成断路器合闸时间、合闸不同期时间严重超标和合闸速度偏低的直接原因。而造成断路器垂直连杆与轴套密封件磨损的根本原因可能存在以下 3 个方面:

1)断路器垂直连杆结构设计不合理。该 GIS 断路器设计采用的是垂直连杆与轴密封件之间的直接接触结构,两者之间仅靠少量的硅脂润滑。断路器垂直连杆部分在厂内安装过程或运输过程中出现密封垫微小错位,即会造成垂直连杆与密封件之间

磨擦,为断路器的安全运行埋下隐患。

2)断路器垂直连杆润滑不足。由于垂直连杆与轴密封垫之间设计采用的是直接接触结构,断路器在长期运行过程中,润滑作用一旦消失,断路器进行分合闸操作时,就会造成垂直连杆与轴密封件之间的直接机械磨擦,影响断路器机械特性。

3)断路器轴密封件安装工艺问题。就如第 1 个方面的原因所述,如果断路器在出厂安装时,垂直连杆与轴密封件之间的安装工艺不能达到垂直连杆与密封件同轴性的要求,就极可能造成垂直连杆与密封件之间的直接机械磨擦。

3 结 语

随着 GIS 设备越来越广泛的使用,GIS 断路器作为变电设备中的关键设备,其重要性都不言而喻。为保障断路器的安全、可靠运行,提出以下几点预防措施:

1)提升 GIS 断路器入厂监造质量,及时发现并消除设备隐性缺陷。提升设备安装质量,严把设备验收、投运关,杜绝设备带病投入电网运行。

2)由于 GIS 断路器结构的严密性,在进行 GIS 断路器机械特性异常分析时,除了最直接的断路器合闸弹簧或分闸弹簧自身质量问题以外,还应该将断路器传动卡涩因素考虑在内。

3)对于类似垂直连杆机构的 GIS 断路器或者常规空气绝缘断路器,应特别注意检查断路器垂直连杆颜色是否出现异常,是否存在黑色异物,防止类似问题的再次发生。

参考文献

[1] 刘同杰,万红艳,刘同敏.一起 GIS 设备密封不良问题原因分析[J]. 四川电力技术,2017,40(6):89-91.
[2] 叶瑞,段继洲,查笑春,等.一种断路器液压弹簧机构泄压控制系统及方法[J]. 电气技术,2016,17(12):15-19.
[3] 李宏仁. 高压开关现场技术精要[M]. 成都:西南交通大学出版社,2014.

作者简介:

刘继午(1988),工学硕士、工程师,从事变电检修工作;
熊攀(1983),工学学士、高级工程师,从事变电检修工作;
肖茂(1989),工学硕士、工程师,从事变电检修工作;
袁国森(1991),工学硕士、助理工程师,从事变电检修工作。

(收稿日期:2018-08-05)

2018 年《四川电力技术》总目录

第 1 期

低频振荡分析方法及抑制策略概述..... 郭 磊,张英敏,李兴源(1)

藏区孤网 QV 特性与过电压风险防控 孙昕炜,史华勃,唐 伟,赖 勇,余莉娜(10)

基于调峰及网架约束的新疆电网风电接纳能力研究..... 宋朋飞,张 锋,亢朋朋,郭小龙,樊国伟,常喜强(14)

核电站无励磁磁系统的电枢电流谐波分析研究..... 刘 念,王贺新,赵 欣(17)

单极接地故障下融冰装置的运行风险评估及对策研究..... 李 训,徐 琳,丁理杰(22)

输电网分布电容对负序方向元件的影响及对策研究..... 王云昊,刘宪栩,吴 杰(27)

抑制风电爬坡事件的双蓄电池组参数优化配置..... 戴长春,章怡帆(31)

载波移相 SPWM 在贯通式同相供电系统中的应用 郭晓宇(36)

一起 110 kV 变压器绕组变形故障分析判断及解体验证 吴 波,丁登伟,唐 铭,王 静,张军强,唐琳凯(39)

220 kV 高压预制式电缆中间接头故障分析与处理 刘凤莲,薛志航,邓元实,朱 轲,张涵轶,杜 颢(44)

基于有限元的 35 kV 气体绝缘母线放电机理及改进方案研究 耿 超,徐 楠,李 宁(49)

一起电抗器差动保护误动事故的分析和对策..... 包顺先,韩安兵,李 辉(53)

主变压器断路器失灵保护回路与时延定值关系分析..... 郭晓鸣(56)

硬件在环实时仿真系统延迟对滞环电流控制仿真影响研究 周宏林,吴小田,代同振(61)

轴流式水轮机转轮室模块化消缺技术研究 胥海波,何志萍(67)

水轮发电机电磁振动及噪声的分析和改造 梁宇强(70)

考虑网架对短路电流适应性的输电网扩展规划..... 陈 伟,刘 莹,刘晓宇(74)

黑启动方案制定及决策支持实用系统..... 史华勃,丁理杰,陈 刚,袁贵川,唐 伦(78)

基于大数据的中压供电可靠性管理系统

..... 陈善兵,赵 静(83)

服务城区发展的主动式配电网规划管理..... 吴怀波,陈 飞,任志莲,陈 洋,孙 磊,许 涛,操丹丹(89)

第 2 期

一种基于多目标的微电网无功优化控制策略..... 刘保磊,钟 俊(1)

风力发电系统可靠性评估体系..... 张 里,李红军,刘兴海,张健美,王婷婷,黄忠胜,张江林 (5)

一种 SCD 层次信息集成可视化系统开发研究 廖小君,吕飞鹏,黄忠胜,韩花荣,章志刚,张 里,王晓茹,郑永康 (12)

一种基于孤岛搜索的电力系统拓扑分层识别方法..... 唐 伦,史华勃,袁 川,丁理杰,周 波(18)

基于自组织映射的改进 BP 神经网络短期光伏出力预测研究 詹仲强,余 金,郭 志,王银涛,克帕依吐·吐尔逊(24)

采用核主成分分析和随机森林算法的变压器油纸绝缘评估方法 张丽平,吴杰康,陶飞达,曾振达,梁浩浩,邹志强,黄智鹏,杨 夏(29)

工频电场测量仪支架材质对空间电场影响研究..... 刘守豹,吴 迪,兰新生(34)

功率晶闸管的浪涌性能研究..... 董汉彬,贾志杰,王嘉易,宁 鑫,李泳龙,戴 玲(38)

基于晶闸管的无触点线路调压装置的低电压治理..... 姚 晓,赵莉华,马啟潇,程胤璋,李 铭(41)

四川电力发展对新能源建设规模影响分析 ... 陈汉雄(46)

导线防冰雪技术应用展望 唐 巍,梁 明(51)

海南联网工程牛皮纸绝缘和 PPL 纸绝缘充油海底电缆技术经济比较 马 凌,赵远涛,吴庆华(56)

500 kV 变电站简化噪声源衰减特性研究 严 青,佟如意,何清怀,陈 笠(60)

水轮机调速器主配压阀结构分析与特点论述..... 朱廷忠,曹维福,王丽萍(63)

九寨沟 Ms 7.0 地震四川电网受损分析及处置措施 韩晓言,刘 洋,范少君,曹永兴(68)

基于红外热像的低零值绝缘子检测技术研究..... 何 良,刘书弟,张禹,何宇航,周电波,姚 晓(72)

浅谈变电站 IED 数据在继电保护中的应用

..... 姜 晨,纪礼君(76)
智能变电站顺控技术工程实践.....
艾 飞,茅 俊,丁 敬,黄继荣,张新来,徐 通,胡冬良(82)
电桥型绝缘油介质损耗测试仪的校验方法研究.....
..... 胡仕红,杨 健(86)
基于电价响应的电动汽车充放电策略研究 万寿雄(90)

第 3 期

基于矩阵特征值分析和 SOA 优化模糊聚类的变压器故障诊断
陶飞达, 吴杰康,曾振达,梁浩浩,邹志强,张丽平,黄智鹏,杨夏 (1)
基于虚拟阻抗的改进型微电网下垂控制策略.....
..... 刘树伟,姚秀萍,王海云,张海宁,张宇宁(6)
基于数字补偿技术改善高压功率源失真度指标的研究.....
..... 羊 静,余 坤,杨勇波,郑 宝,陈忠勇(12)
高海拔 500 kV 交流线路空气间隙及海拔修正试验研究
..... 罗 琦,王 强,李 力,丁玉剑,艾 鹏(17)
高海拔 500 kV 输电线路绝缘子污闪特性试验研究
..... 罗 强,王 强,罗 鸣,黄瑞平,张劲骁(25)
计及 LVRT 控制的直驱风电机组三相短路故障特性研究...
陈伟伟,吕 盼,张增强,宋新甫,刘明红,翟旭京,卫俊辰 (31)
考虑负荷不确定性的微电网优化调度研究
..... 杜继成,张真源, 张宇馨(38)
配电网架空绝缘导线暂态载流能力计算与评估
..... 张 禹,江少成,何 良,吕世超,奚晓航,奚海波(43)
光伏发电在地铁牵引供电系统中的应用研究.....
..... 郭晓宇(48)
直流电源系统在国内外的应用状况.....
..... 陈轲娜,罗 锦,宁 鑫,李 晶,罗 洋(52)
电力负荷预测研究综述及预测分析.....
..... 杨博宇,陈仕军(56)
• 设备研制及调试 •
智能变电站 PMU 装置测试仪研制..... 何 笠,
滕予非,石 涛,冯世林,刘明忠,黄俏音,陈罗飞,李东升(61)
基于全场景系统的新一代智能变电站整组传动调试方法
..... 李泳龙,郑永康,李小鹏,沈大千,董汉彬(68)
基于逻辑回归的高压并联电抗器过流误报警判别方法
..... 朱丽嫚, 罗荣森,冯世林,滕予非(73)
BESS 参与风电辅助服务市场效益敏感性分析
..... 张 伟,马美婷,秦艳辉,皮 霞,袁铁江,刘沛汉(77)
基于 STATCOM 的配电网三相不平衡治理
..... 刘小江,赵莉华,何宇航,赵茂林, 李 铭(82)

面向四川电力业务运行的信息安全保障体系构建研究.....
..... 杨嘉湜,杨 帆(88)
工业铂电阻测量结果的不确定度评定.....
..... 江正涛, 彭剑英(92)

第 4 期

考虑容错的配电自动化主站故障定位方法.....
..... 高艺文,姜振超,冯世林,崔 弘,龙 呈(1)
最小断点集的简化计算与组数扩充 周文越,李 霞(5)
提升最大供电能力的配电网馈线联络优化.....
..... 唐小菊,江东林(9)
小电流接地系统异名相接地故障分析及跳闸策略研究.....
..... 徐培栋,冯 靖(14)
一种电网云平台资源调度算法的研究.....
..... 蔡 玺,屈 伟,李秋燕(19)
北京地区 10 kV 配电网架空线路自环互联式接线研究分析
..... 刘保全(23)
基于云储能和云发电技术的集中控制云电网系统研究.....
..... 莫思特,刘天琪,曾 琦,李 茜(28)
基于点云数据的变电站三维仿真模型的实现及展望.....
..... 田小壮,赵丰刚,刘海影,曾庆松,刘力帅(32)
交直流互联系统附加控制器设计综述.....
..... 王 磊,胡永银,张 珂(37)
± 1100 kV 换流站直流场防雷设计研究
..... 王 强,包维瀚,余 波,苏 林,丁晓飞,邹家勇(44)
风电经分频输电并网系统穿透能力计算方法研究.....
..... 李 熠,滕予非,朱丽嫚,李小鹏(50)
新能源汇集区域次同步振荡控制防线的研究与应用.....
..... 戴拥民,周 专,常喜强,吕 盼,吴高磊,徐龙秀(55)
射频能量采集系统的谐波抑制技术
..... 孟祥麟(60)
基于电力数据的经济景气指数模型研究.....
..... 李赋欣,罗晓伊,沈 军(64)
特高压换流站单相短路电流抑制措施及对电网可靠性的影响分析
..... 徐 杰,李 燕(69)
特高压换流站直流隔离开关烧蚀分析及改进.....
..... 孙光宇,蒋张威,刘 帅,余 立(73)
500 kV GIS 变电站雷电侵入波波形分析.....
..... 唐 峰,黄荣辉,李德斌,刘顺桂,赵雪琳,文 凯(78)
关于架空输电线路载流量计算方法的分析及改进.....
..... 侯世春,姜德胜(82)
宜宾换流站换流变压器冷却器应对交流电网扰动隐患分析
..... 王晨睿(85)

复龙换流站饱和和保护异常情况分析·····	高艺文,刘明忠,吴 杰(1)
····· 肖资阳,舒 平,贾书航(90)	
第 5 期	
基于改进二进制粒子群算法的配电网多目标重构·····	
····· 张 珂,石 俊,王 磊(1)	
基于大数据的配电网停电分析与管理 ·····	谭 文,
杨雪梅,叶 敏,李 智,唐 朝,张 禹,曾 娜,李卓雯 (5)	
一起双电源小电流接地系统异名相两点接地短路故障分析	
····· 朱凤娟,姚元文, 陈 澈,宋全林,杨 夏(10)	
基于配电自动化的合解环决策分析研究·····	
· ····· 崔景顺,杨火平,余卫东,余 湘(14)	
一体化配电网合环在线校核系统的建设与应用·····	
····· 王 玺,刘 巍(22)	
提升配电网电缆附件隐患检测效率的综合检测方法·····	
韩启贺,解 磊,张增智,张 禹,唐 朝,曾 娜,李卓雯 (25)	
有序放开发用电计划及电网企业应对策略研究·····	
· ····· 魏 阳,罗晓伊,佟如意,严 磊,梁 健(29)	
计及风速与线路故障率周期时变特性的风电并网系统可靠性评估	
····· 严 勤,万小花,李浩然(34)	
± 800 kV 新松换流站换流阀外冷却系统选型与设计	
····· 邓 晓,何 勇,余 波(43)	
采用经纬仪的变电站地基沉降监测分析法 ·····	王运田(49)
功率晶闸管的热敏特性研究·····	
董汉彬,贾志杰,王嘉易,宁 鑫,李泳龙,张明丽,余 丰 (54)	
变压器励磁涌流的抑制方法综述·····	
····· 张文韬,王渝红,丁理杰,史华勃,宋雨妍,李天泽(56)	
基于“场”和“路”结合的 500 kV MOA 带电测量相间干扰研	
究分析 ·····	何大猛(63)
基于 IAHP、系统分析法和 IFCEM 的火电厂安全风险评估模	
型 ·····	闵令民,范建兵,张洪国,赵学花(67)
一起断路器绝缘拉杆松动事故分析及防范措施研究·····	
····· 王嘉易,翁 钰,贾志杰,陈 杰,董汉彬(73)	
智能电网调度控制系统变电站集中监控功能的几项实用化改进	
····· 李 熠,龚成明,何 锐,朱丽嫒,高 剑,孙世明(76)	
基于重大活动保供电的多级联合调控管理模式探索	
····· 杨 翺,刘 剑,李 祥,时 锐,李 甘(80)	
基于三级管控模式下的电力科研企业综合计划管理提升	
····· 唐 静,郑 凯,张 燃(86)	
基于电脑钥匙易损状况与改进措施的分析研究·····	
····· 杜禹瑶,栗和林(91)	
····· 高艺文,刘明忠,吴 杰(1)	
农村配电网 10 kV 线路重合闸成功率的影响因素研究·····	
····· 朱丽嫒,高艺文,李 熠(5)	
基于 10 kV 馈线负荷全转移约束下的变电站全停校验模型	
研究及应用 ·····	叶 璐,
王小红,常耀文,韩 阳,唐 朝,张 禹,李卓雯,曾 娜 (9)	
基于 DIGSILENT 建模的 10 kV 中压线路供电半径优化研究	
· ·····	刘代刚,王震泉,张文嘉(13)
基于串补技术的配电网电压改善特性分析及应用·····	
····· 李 磊,	
唐 朝,范福强,汪辰珏,全 翺,张 禹,李卓雯,曾 娜 (18)	
一种新型 10 kV 配电网不停电作业工具改进与应用·····	
····· 叶东辉,	
陈 戈,全 翺,张 禹,唐 朝,吴志民,李卓雯,曾 娜 (23)	
低温环境下 XLPE 材料中水树生长特性的研究 ·····	
····· 冯 杰,濮峻嵩,刘 曦,周 凯,李康乐,张春硕(28)	
输电线路超短期覆冰厚度精准预测模型研究·····	
····· 莫思特,刘天琪,曾 琦(32)	
计及剩磁、合闸电阻及选相合闸策略的励磁涌流仿真评估方	
法 ·····	周 波,常晓青,张 华,魏 巍,史华勃(37)
区域电网电压暂降分析及评估方法研究·····	
····· 李 训,许 可,肖 丽(41)	
基于市场风险和风险偏好的购电商最优决策研究·····	
····· 严 磊,罗晓伊,佟如意,魏 阳(47)	
基于热通道模型的电能表外置断路器温升研究·····	
····· 梁 捷(52)	
新能源物流车充电站设施选址评价模型研究·····	
····· 周鹏程,吴南南,曾 鸣(56)	
基于改进 DE 的含风电机组配电网多目标无功优化 ·····	
····· 冯 肯,杨 迪,肖 汉,李嘉逸(60)	
基于多维量测数据序列的电压互感器故障识别方法·····	
····· 龙 呈,刘明忠,常晓青,吴 杰,高艺文,段翔兮(66)	
一起 500 kV HGIS 外置式电流互感器线圈受潮缺陷分析及	
处理 ·····	唐 静,罗 洋,龙震泽(71)
钢芯高强度耐热铝合金导线在 500 kV 大跨越工程中的应用	
····· 罗 强,罗浩元(75)	
新型一体化五防系统在变电站的应用·····	
····· 江东林,刘青丽,王峥皓,伊永亮,覃天军(80)	
300 MW 汽轮机汽封改造及启动振动控制实践 ·····	
····· 晏红兵,刘勇军(85)	
一起 GIS 断路器合闸机械特性异常原因分析·····	
····· 刘继午,熊 攀,肖 茂,袁国森(89)	