

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
(国网四川省电力公司技能培训中心,四川 成都 611133)

摘 要:配电网重构作为配电自动化系统的一个重要组成部分,能够有效提高配电网运行的经济性和可靠性。提出以网络有功网损和网络电压偏移构建配电网重构的多目标数学模型,根据系统初始状态将各指标归一化处理,利用权重系数法将多目标重构问题转化为单目标问题。为克服二进制粒子群算法容易陷入局部最优而难以跳出的问题,将非线性动态调整的惯性权重系数引入到粒子速度更新公式之中,以提高二进制粒子群算法的全局搜索效率和收敛速度。算例结果验证了所提方法的有效性。

关键词:配电网;多目标重构;非线性惯性权重;改进二进制粒子群

中图分类号:TM711 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)05-0001-04

Multi – objective Reconfiguration of Distribution Network Based on Improved Binary Particle Swarm Algorithm

Zhang Ke, Shi Jun, Wang Lei
(State Grid Sichuan Technical Training Center, Chengdu 611133, Sichuan, China)

Abstract:As an important part of distribution automation system, distribution network reconfiguration can effectively improve the economical efficiency and reliability of the operation of distribution network. The multi – objective mathematical model of distribution network reconfiguration is constructed by network active power loss and network voltage offset. The indicators are normalized according to the initial state of the system, and the multi – objective reconfiguration problem is converted into a single – objective problem by weight coefficient method. In order to overcome the problem that the binary particle swarm algorithm (BPSO) is easy to fall into local optimum and difficult to jump out, the inertial weight coefficient of nonlinear dynamic adjustment is introduced into the particle velocity update formula to improve the global search efficiency and convergence speed of binary particle swarm algorithm. Results of calculation example show that the proposed method is effective.

Key words:distribution network; multi – objective reconfiguration; nonlinear inertia weight; improved binary particle swarm

0 引 言

配电网作为电力系统中直接与需求侧连接的关键部分,其作用是向用户提供安全、经济及可靠的电能供应,因此,配电网的安全高效运行至关重要。在满足各种约束条件的情况下,配电网重构能够找到实现配电网安全高效运行的最优拓扑结构,是配电自动化技术研究的主要内容之一,也是智能电网的重要功能之一^[1-2]。

现阶段已有不少对配电网重构的研究,从目标函数的构造上来说,既有单目标重构,也有多目标重构;从优化算法上来说,目前各种人工智能算法在配

电网重构中得到了广泛的应用。各种不同的重构优化方法各有侧重,也各有优缺点。文献[3]以系统有功网损、线路功率传输裕度以及节点电压偏移构建重构优化的多目标函数,通过隶属度函数和欧式距离算法将多目标优化问题转化为单目标问题,采用改进的二进制粒子群算法迭代寻优。文献[4]研究了利用改进和声搜索算法对含有分布式发电(distributed generation, DG)的配电网多目标重构问题,但只是将 DG 作为“负”的负荷进行潮流计算, DG 模型较简单。文献[5]提出一种离散学习优化算法,对含有 DG 的配电网进行以有功网损最小为目标的单目标重构研究,算法较复杂不易实现。文献[6]提出了一种基于无重访机制的 NSGA – II 算

法,用于求解使配电网有功网损降低和供电可靠性提高的多目标重构问题,该算法能够有效避免重复计算,提高求解效率。

这里提出以网络有功网损和网络电压偏移两个指标来构建多目标配电网重构的目标函数,借助网络初始状态将量纲不同的指标进行归一化处理。考虑对网络重构效果的侧重性,利用权重系数法将多目标函数转化为单目标函数,调度人员可根据需要调整各指标的权重系数。运用改进二进制粒子群算法求解所建立的多目标配电网重构数学模型,得到满足各种约束条件的配电网安全经济运行的最优拓扑结构。

1 数学模型

1.1 多目标函数

网络有功网损的高低能够反应配电网经济运行状况的优劣,网络电压偏移是反应配电网电能质量的一项重要技术指标,下面利用以上两个指标构建多目标函数。

1) 网络有功网损

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n k_i I_i^2 R_i \quad (1)$$

式中: P_{loss} 为网络的有功网损; n 为网络中的总支路数; k_i 为开关*i*的状态, $k=1$ 为开关闭合, $k=0$ 为开关断开; I_i 为流过支路*i*的电流; R_i 为支路*i*的电阻。

2) 网络电压偏移

$$U_{\text{bias}} = \sum_{l=1}^m \left| \frac{U_{\text{IN}} - U_l}{U_{\text{IN}}} \right| \quad (2)$$

式中: U_{bias} 为网络的电压偏移; m 为网络中的节点总数; U_l 为节点*l*处的实际电压; U_{IN} 为节点*l*处的额定电压,一般取 $U_{\text{IN}}=1$ 。

3) 构建多目标函数

首先,利用配电网初始拓扑结构所对应的系统指标将上述两个指标进行归一化处理,以解决数量级、量纲等不同的问题。再通过加权求和的方式将多目标函数转化为单一目标函数,可表示为

$$\min F = \omega_1 \cdot \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{loss0}}} + \omega_2 \cdot \frac{U_{\text{bias}}}{U_{\text{bias0}}} \quad (3)$$

式中: F 为目标函数; P_{loss0} 为配电网初始状态下的有功网损; U_{bias0} 为配电网初始状态下的电压偏移; ω_1 、 ω_2 分别为网络有功网损和网络电压偏移的权重系数,满足 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

1.2 约束条件

1) 网络潮流约束

$$\begin{cases} P_l = P_{dl} + U_l \sum_{j=1}^m U_j (G_{lj} \cos \delta_{lj} + B_{lj} \sin \delta_{lj}) \\ Q_l = Q_{dl} + U_l \sum_{j=1}^m U_j (G_{lj} \sin \delta_{lj} - B_{lj} \cos \delta_{lj}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_l 、 Q_l 分别为节点*l*处注入的有功功率和无功功率; P_{dl} 、 Q_{dl} 分别为节点*l*处负荷的有功功率和无功功率; G_{lj} 、 B_{lj} 、 δ_{lj} 分别为节点*l*、*j*之间的电导、电纳和相角差; m 为网络中的节点总数; U_l 、 U_j 分别为节点*l*、*j*处的电压幅值。

2) 支路功率约束

$$S_i \leq S_{i\text{max}} \quad (5)$$

式中: S_i 为支路*i*中流过的功率; $S_{i\text{max}}$ 为支路*i*中允许流过的最大功率。

3) 节点电压约束

$$U_{\text{imin}} \leq U_l \leq U_{\text{lmax}} \quad (6)$$

式中, U_l 、 U_{lmax} 、 U_{imin} 分别为节点*l*处的实际电压及其上、下限。

4) 网络拓扑约束

重构过程中配电网的拓扑结构必须是连通的且呈辐射状,不存在环路及孤岛。

2 重构算法设计

2.1 改进的二进制粒子群算法

标准的粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)是由 Kennedy 等人受到鸟类在搜寻食物的过程中,出现的迁徙和群集行为的启发而提出的^[7-8]。后来,他们为了解决离散空间域的优化问题,于1977年提出了二进制粒子群算法(binary particle swarm optimization, BPSO)。

在 BPSO 中,每个粒子根据式(7)更新自己速度:
$$V_{id}^{t+1} = \omega \times V_{id}^t + c_1 \times r_1 \times (X_{id}^t - p_{\text{best}}) + c_2 \times r_2 \times (X_{id}^t - g_{\text{best}}) \quad (7)$$

式中: V_{id}^t 、 X_{id}^t 分别为粒子*i*在第*t*次迭代时的第*d*维个体的速度和位置; ω 为惯性权重系数; c_1 、 c_2 表示加速系数; r_1 、 r_2 为0至1之间的随机数; $X_{id}^t - p_{\text{best}}$ 为粒子*i*在第*t*次迭代时第*d*维个体最优的位置; $X_{id}^t - g_{\text{best}}$ 为整个粒子群在第*t*次迭代时第*d*维全局最优的位置。

BPSO 中,每个粒子位置 X_{id}^t 的取值仅为0或者1,粒子的速度越大则表示位置值为1的概率越大。

粒子位置更新公式为

$$X_{id}^{t+1} = \begin{cases} 1, r < S(V_{id}^t) \\ 0, r \geq S(V_{id}^t) \end{cases} \tag{8}$$

式中： r 为 0 至 1 之间服从均匀分布的随机数； $S(x)$ 为 Sigmoid 函数：

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \tag{9}$$

由于配电网重构属于一种规模较大的混合整数非线性规划问题，BPSO 在解空间搜索过程中非常容易陷入局部最优域而无法跳出，导致搜索结果收敛于局部最优而不是全局最优。为了克服此不足，利用改进的二进制粒子群算法^[9]对所建的配电网重构数学模型进行求解。为合理平衡 BPSO 全局和局部搜索能力，对式(7)中的惯性权重系数 ω 进行改进，改进之后的惯性权重系数不再是一常数，而是能够随着搜索的进行不断地非线性递减，这样有助于算法跳出局部最优。改进惯性权重系数公式为

$$\omega(t) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times e^{(1 - \frac{t_{\max}}{t})} \tag{10}$$

式中： $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 分别为惯性权重系数的最大、最小取值，其取值范围通常为 0.4 ~ 0.95； t 、 $t_{\max}$ 分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

改进之后，在迭代初期， ω 较大，算法具有较强的全局搜索能力，能够让粒子尽可能快地搜索整个解空间，找到全局最优解所在的邻域。当迭代进行到中期， ω 逐渐地非线性减小，粒子搜索范围也以全局最优解邻域为中心逐渐缩小。到了迭代后期，基于指数函数非线性变化的特点， ω 会加速减小，算法的局部搜索能力得到增强，粒子就能够在全局最优解邻域搜索到全局最优解。引入非线性调整惯性权重系数的 BPSO 的全局搜索效率和收敛速度均得到提高，称为非线性调整惯性权重二进制粒子群算法 (ULWBPSO)，流程如图 1 所示。

2.2 其他说明

1) 编码原则

通常，配电网都是闭环设计而开环运行的，可以说一个联络开关决定一条环路，因此采用了基于环路的编码原则。

在使用的 ULWBPSO 中，每个粒子的维度即为配电网中联络开关的个数，每一维的数字即为需要断开的开关编号；与电源直接相连的开关和不在任何环路上的开关由于必须闭合不参与编码；为保证配电网呈辐射状运行，每个环路只能断开一个开关，

且每个环路断开的开关编号必须互不相同且不在同一支路上^[10]。

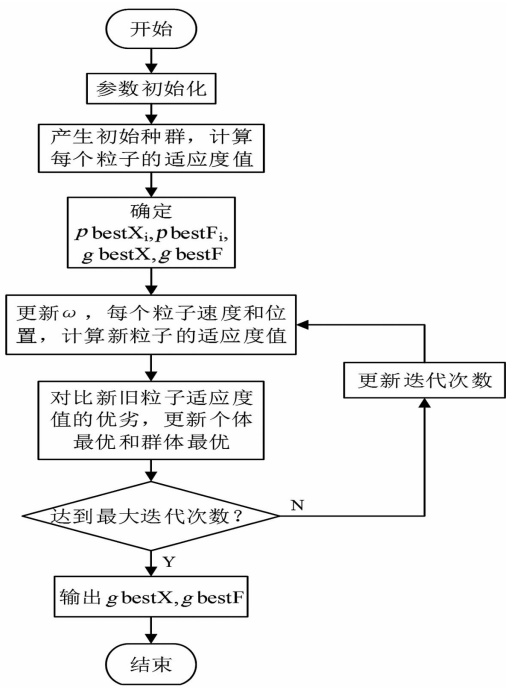


图 1 ULWBPSO 流程

2) 无效解的处理

基于环路的编码原则产生的粒子并不全是有效解。部分粒子所对应的配电网拓扑结构可能呈辐射状，但是却不满足连通性的要求，会出现孤岛存在的情况。因此需要对初始粒子和迭代更新后的粒子进行有效性检验：首先，每个粒子所对应的配电网拓扑结构必须呈辐射状；然后根据图论并结合树状结构特点，对每个粒子所对应的配电网拓扑结构连通性进行判断^[11]。这样的处理可以避免无效解的产生，提高算法搜索效率。

3 算例分析

所用的重构算例来自文献[12]，为 IEEE 33 节点配电网系统，系统额定电压为 12.66 kV，共有 33 个节点和 37 条支路，含有 5 个联络开关，编号分别为(33,34,35,36,37)，系统总负荷为(3715 + j2300) kVA，单线图如图 2 所示。ULWBPSO 的参数设置为：粒子群规模 sizepop = 40，最大迭代次数 $t_{\max} = 50$ ，惯性权重系数 $\omega_{\max} = 0.95$ 、 $\omega_{\min} = 0.4$ ，加速系数 $c_1 = c_2 = 1.496\ 2$ 。指标权重系数 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ (有功网损和电压偏移指标同等重要)。以式(3)为目标函数，采用 ULWBPSO 寻优，仿真结果如表 1 所示。

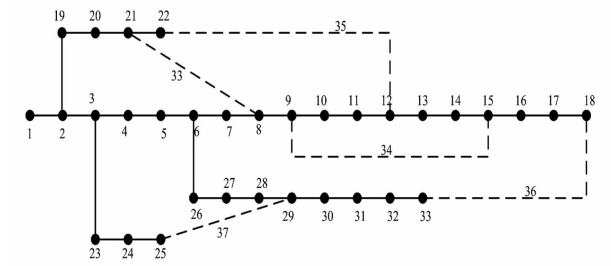


图 2 IEEE 33 节点系统

表 1 重构结果						
项目	打开开关	有功网损 /kW	电压偏移 /(p. u.)	最低节点 电压 /(p. u.)		
重构前	33,34,35,36,37	202.676 2	1.701 3	0.913 1		
方案 1	7,9,14,28,32	139.976 7	1.077 3	0.941 3		
方案 2	7,9,14,28,36	141.916 3	1.062 6	0.937 8		

由表 1 可知,网络重构之后,系统的有功网损和电压偏移均得到了有效降低,且最低节点电压也得到了明显提高。

方案 1 将有功网损降低到 139.976 7 kW,降低率为 30.94%,将电压偏移降低到 1.077 3 p. u.,降低率为 36.68%,将最低节点电压提高到 0.941 3 p. u.,提高率为 3.09%。

方案 2 将有功网损降低到 141.916 3 kW,降低率为 29.98%,将电压偏移降低到 1.062 6 p. u.,降低率为 37.54%,将最低节点电压提高到 0.937 8 p. u.,提高率为 2.71%。

方案 1 对有功网损的改善略优于方案 2,而方案 2 对电压偏移的改善略优于方案 1,但差距不明显,综合考虑两个方案的最低节点电压,认为方案 1 为最佳重构方案。重构前、方案 1、方案 2 的系统节点电压如图 3 所示。

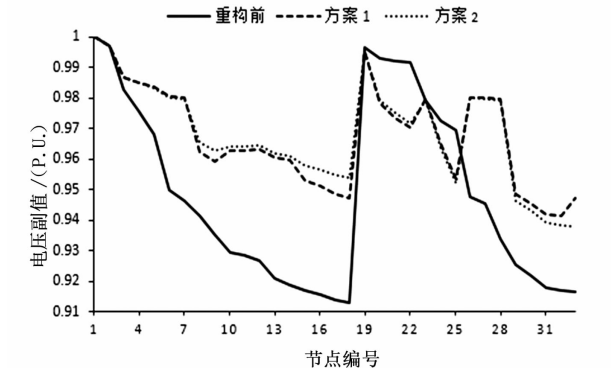


图 3 节点电压水平

为了验证改进二进制粒子群算法(ULWBPSO)的性能,分别使用 ULWBPSO 与 BPSO 对 IEEE 33 节点系统进行重构仿真。分别记录两种算法获得 50

次全局最优解的迭代次数,如图 4 所示。

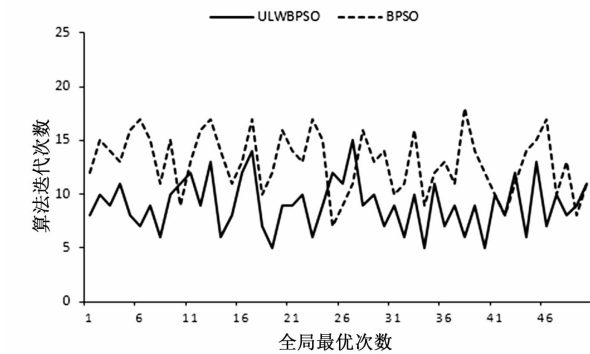


图 4 迭代次数对比

从图 4 中可以看出,ULWBPSO 获得全局最优解所需的迭代次数明显低于 BPSO。ULWBPSO、BPSO 获得全局最优解的平均迭代次数分别为 9.06 次、12.96 次,表明通过引入非线性动态调整的惯性权重系数,算法的全局搜索效率和收敛速度得到一定提高。将所提算法与其他文献算法进行比较,结果如表 2 所示,表明所得算法具有一定优势。

表 2 算法比较

项目	文献[13]	文献[14]	所提算法
最小迭代次数	19	7	5

4 结 语

提出以配电网有功网损和网络电压偏移构成多目标函数,并根据网络初始状态对多目标归一化处理并加权求和,将其转化为单目标函数。将非线性动态调整的惯性权重系数引入二进制粒子群算法,提高其全局搜索效率和收敛速度。仿真结果表明,所提出的方法能够对配电网进行有效重构,降低系统有功网损和电压偏移,提高配电网运行的经济性和可靠性,易于实际应用来提高配电网自动化水平。

参考文献

[1] Chen S, Hu W, Chen Z. Comprehensive Cost Minimization in Distribution Networks Using Segmented - time Feeder Reconfiguration and Reactive Power Control of Distributed Generators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 983 - 993.

[2] Srinivasa Rao R, Narasimham S V L, Ramalinga Raju M, et al. Optimal Network Reconfiguration of Large - scale Distribution System Using Harmony Search Algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1080 - 1088.

(下转第 9 页)

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
(国网四川省电力公司德阳供电公司,四川 德阳 618000)

摘要:拓展完善配电网停电分析与管理工作,有助于提升供电公司的对内运维管控和对外供电服务水平。通过全面融合调度自动化、配电自动化、用电信息采集系统等营配调专业的实时运行数据以及PMS、OMS、SG186系统等业务数据,利用大数据技术,从停电信息编译发布、停电信息分析以及停电计划管控3个方面对现有的停电分析与管理工作进行了扩展和完善,实现了停送电信息的自动收集、编译和精准发布,并通过对配电线路、配电变压器等设备实时运行数据的监测以及历史停电情况的分析统计,强化了停电计划的安排和执行跟踪管控。

关键词:大数据;配电网;停电分析;停电管理

中图分类号:TM721 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)05-0005-05

Analysis and Management on Power Failure for Distribution Network Based on Large Data

Tan Wen, Yang Xuemei, Ye Min, Li Zhi, Tang Chao, Zhang Yu, Zeng Na, Li Zhuowen
(State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract:Expanding and perfecting analysis and management on power failure is helpful to improve the operation, management and service level of power supply company. By blending the real-time data and the business system data, such as date of outage management system, distribution management system and power production management system and SG186 system, the analysis and management on power failure are expanded and perfected in three major areas: release, analysis and plan management on power failure, which realizes the automatic collecting, automatic compiling and accurate sending of outage information. Through monitoring the real-time data of distribution lines and transformers, and analyzing the statistics of outage information, the planning and performance arrangement of power failure are strengthened.

Key words:big data; distribution network; outage analysis; outage management

0 引言

配电网作为电网的重要组成部分,是与客户用电密切相关的重要环节。配电网的停电分析与管理工作直接影响着供电公司的供电可靠性水平和客户的用电体验。因此,做好该项工作无论是对提升优质服务水平和企业社会形象,还是对促进售电量增长、提高企业效益都具有十分重要的意义。配电网停电分析与管理工作涉及调度、营销和生产等多部门业务以及调度管理系统、营销SG186系统、生产PMS系统等大量数据信息,具有涉及部门面广、数据信息量大的特点。目前工作中仍存在停电信息无法精准通知到户、频繁停电和未按计划停送电等管

控不到位问题。

目前,大数据已在全球范围内被广泛应用于商业、电力、石油等数据密集型企业,以提高企业管理水平与行业竞争力^[1-4]。而配电网网络规模大、设备种类多,配电自动化、用电信息采集等各类应用系统累积的海量多源、异构的数据也呈现出大数据的各项特征^[5]。如何有效地挖掘并利用能反映配电网设备运行状态的细颗粒度大数据,越来越受到学者关注和讨论^[6-12]。文献[13-16]研究了大数据技术在配电网低电压、线损计算和主动抢修等方面的应用。文献[17]提出了基于大数据分析的配电网停电数据管理平台,但仅局限于大数据在故障停电的预警、告警和原因分析方面的应用,尚不能满足实际的配电网停电分析管理需要。

为了有效利用配电网“大数据”所承载的巨大价值,下面应用大数据技术,从停电信息编译发布、停电信息分析以及停电计划管控3个方面拓展完善现有的配电网停电分析管理工作,不仅能实现停送电信息对外精准告知服务,提升用户用电体验,同时有助于对内强化停电计划安排、执行与管控,有效减少频繁停电、停电计划执行不到位的情况,实现对停送电信息的全方位精益化管理。

1 数据及功能构架

基于大数据的停电分析与管理,全面融合调度自动化系统、配电自动化系统、用电信息采集系统、PMS系统、OMS系统、SG186系统、95598系统等营配调专业的实时运行数据以及业务管理数据,搭建了开放式大数据云计算平台,并以此为核心实现停电范围自动编译、停电信息精准告知、配电变压器停运研判、频繁停电预警以及停电计划安排与管控等功能应用,以满足用电客户在停送电信息方面的服务需求以及实现企业内部对停电分析与管理工作的精益化管控目标。

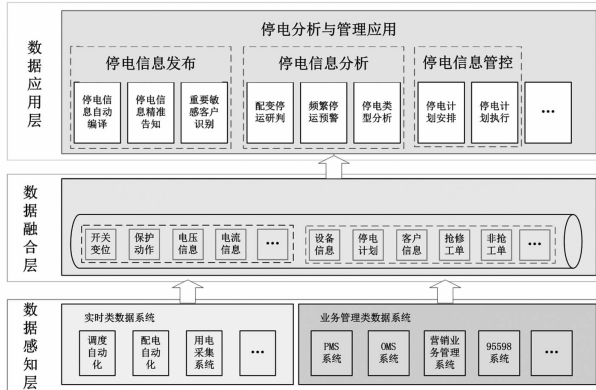


图1 配电网停电分析与管理数据及功能构架

2 停电信息编译发布

2.1 停电范围自动编译

利用大数据实现停电范围的自动编译,以提高停电范围编译的准确性和及时性。首先,从OMS系统自动获取计划停电信息,从调度自动化、配电自动化以及用电信息采集系统分别获取配电网10 kV主馈线、分段线路、分支线以及配电变压器故障停电信息。然后,利用PMS系统设备台账数据进行网络拓

扑分析,根据计划停电以及故障停电信息中的停电开关设备,自动分析编译具体的停电设备范围。

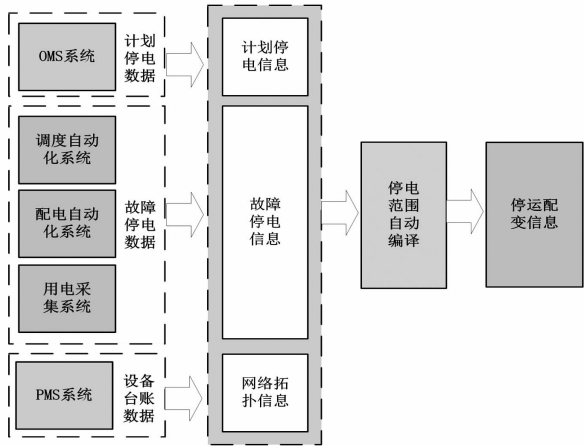


图2 停电范围自动编译应用数据来源

利用PMS系统设备台账数据实现停电范围自动编译:从PMS系统中读取架空线路、电缆线路、开关设备、杆塔设备以及变压器设备等台账数据信息。通过架空线路“起始杆塔”和“末端杆塔”、电缆线路“电缆起点”和“电缆终点”、其他设备的所属杆塔或站房设备等信息还原电网的设备拓扑连接关系,在获取到停电开关设备信息后,以停电开关为边界点,采用广度优先搜索技术自动生成各停电开关影响的停电设备,实现停电范围的自动编译。

2.2 重要、敏感客户识别

不同类型的用电客户对停电有不同的忍耐度。对重要用户而言,突然中断供电可能会造成爆炸、火灾、重大设备损坏等恶性事故发生,需要及时、准确告知其停电信息,以便提前做好停电应急预案。对于多次致电或有过投诉记录的敏感客户而言,停电通知不到位则可能再次引起客户不满和投诉。因此,利用SG186系统客户档案信息、95598抢修工单和非抢修工单数据信息,设置一定筛选条件生成重要、敏感用户台账,并在停送电信息的停电客户中准确识别出该类客户,精准开展停电信息告知及服务工作。

重要、敏感客户筛选规则如下:

- 1)根据SG186系统中用户档案信息中的“重要性等级”字段,从系统中筛选客户形成不同类型重要客户的台账,包括:①特级重要用户;②一级重要用户;③二级重要用户;④临时性重要用户。其他类型重要用户可人工添加到重要用户台账中进行管理。
- 2)根据客户故障报修工单、投诉和意见等非抢修工单历史记录生成敏感客户台账,生成规则包括:①

在历史工单中有 3 次及以上报修记录的频繁报修客户;②有投诉记录的客户;③回访不满意客户;④客户社区经理提供的敏感客户。

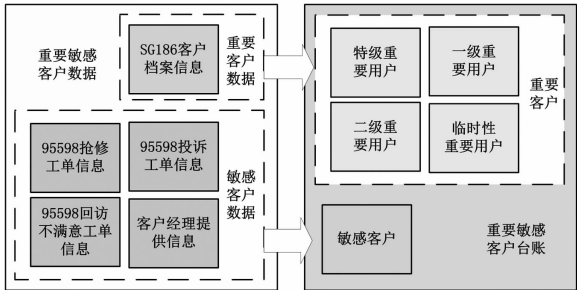


图 3 重要、敏感客户数据来源

2.3 停电信息精准发布

1) 停电分析到户

实现停电信息精准发布的前提是停电分析到户。将计划停电和故障停电信息自动编译到具体的停电设备后,利用 PMS 系统与 SG186 系统设备的营配贯通关联基础,可以在 SG186 系统中查询到对应停电设备供电的所有客户,实现停电信息精准分析到户。

2) 停电信息精准告知

停电信息分析到户后,将停电客户与重要、敏感客户台账进行关联比对,重点标识停电范围中的重要、敏感客户,并为该类客户有侧重地进行停电信息精准告知等服务。同时,将停电信息同步发送给台区经理,由台区经理负责对其所管理的台区客户进行停电信息告知。

获取客户的联系方式主要有:以 SG186 系统客户档案中的联系方式为基础,根据掌上川电 APP 中客户户号绑定的手机信息对客户档案中的联系方式进行更新,同时采用客户报修工单中的手机信息对客户联系方式进行补充。

3 停电信息分析

3.1 配电变压器停运判定及损失电量估算

为了能够更直观、真实地掌握客户停电情况,并为进一步开展频繁停电分析、停电计划执行情况分析提供有效的信息支撑。利用用电信息采集系统配变电压、电流和表码数据对配电变压器停运情况进行分析。

基于用电信息采集系统以 15 min 为 1 个采集

点获取的配电变压器电压、电流和表码数据对配电变压器停运情况进行研判。首先,利用经验筛除存在质量问题的异常数据;然后,将连续 4 个采集点无电压、电流值的配电变压器初步判定为停运,再进一步通过表码数据进行验证;最后,以前后第 7 天同时段电量平均值作为停运时段的损失电量。

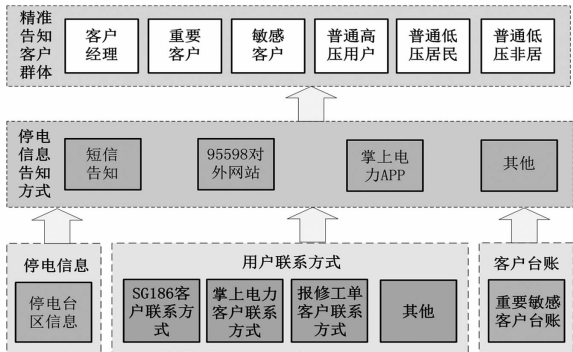


图 4 停电信息精准告知功能

其中,按照以下经验筛除存在质量问题的异常采集数据:将 1 天内出现 10 次连续大于 4 个点无电压、电流数据的情况,视为循环无数据问题;连续 96 个点无电压、电流数据,判定为 24 h 无数据问题。将这两类无数据问题作为异常数据,不再进行配电变压器停运判定。通过表码数据验证配电变压器真实停运,主要包括:①该段时间内无电量产生;②该段时间前后表码电量止度随时间递增无异常;③取该段时间前后各 1 个有数据的测量点,计算其电量差值。若该电量值小于前后相邻两个测量区间电量值平均值的 2/3,判定配电变压器真实停运。

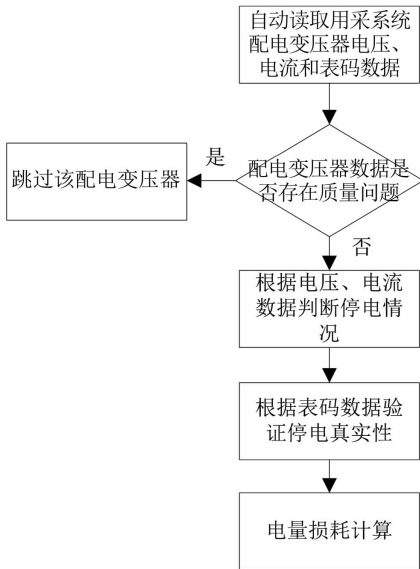


图 5 配电变压器停运判定流程

3.2 停运类型分析

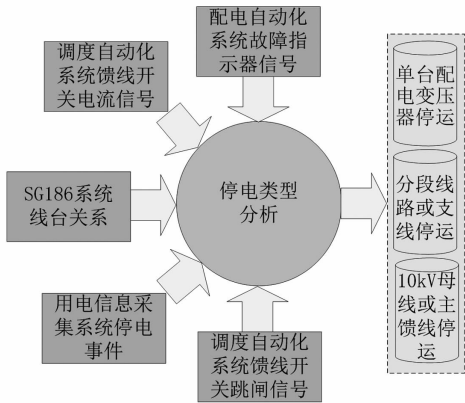


图 6 配电变压器停运类型分析

在获取用电信息采集系统配电变压器停运信息以后,根据调度自动化系统的开关跳闸、电流突变情况以及配电自动化系统支线开关跳闸、故障指示器告警等信息,研判属于单台配电变压器停运、分段线路停运、分支线停运或主馈线停运,同时结合计划停电以及线路故障跳闸情况判断是属于计划停电或者故障停电,及时主动开展停运类型分析,快速发布停电信息,拦截 95598 故障报修。

3.3 频繁停电预警

利用调度自动化数据、配电自动化数据获取线路或支线停电信息,并利用用电信息采集系统获取到配电变压器停电信息之后,将停电线路、停电台区同历史停电信息进行比较,对即将超过停电次数的停电线路、台区进行预警,严格管控对应线路、台区的不合理停电;对于已超过预警次数的停电,生成频繁停电预警督办工单,派发工单至相关人员,开展重点巡视、设备消缺、现场解释等工作。

4 停电计划管控

4.1 停电计划安排

充分利用历史停电信息、保电信息以及非抢工单信息,为停电计划安排提供参考。将停电申请信息在申请停电时间的前后一段时间内,与其他已执行、未执行的停电计划、停电申请、10 kV 故障记录比对,来判断预安排的计划停电线路是否超过规定的停电次数,合理安排停电工作,实现“一停多用”或推迟停电工作避免引发频繁停电投诉;通过与系统录入的保电信息数据比对,核实计划停电是否与相关保电工作冲突,调整计划停电时间或提前做好

保电应急预案;调取停电范围内客户投诉记录,核实该计划停电是否包含具有投诉倾向的敏感客户,提前与客户进行协调沟通或调整停电计划安排。

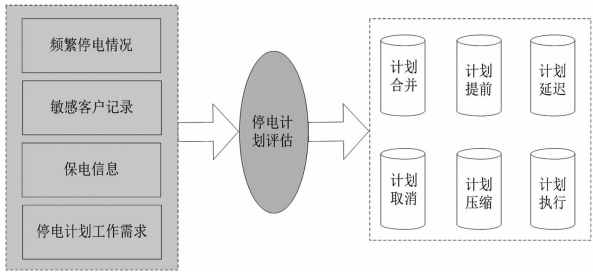


图 7 停电计划安排

4.2 停电计划执行管控

当停电信息对外公告后,未按计划执行停电将给客户既定的生产、生活安排产生影响,严重时可能引发客户投诉。利用调度自动化、配电自动化、抢修和非抢工单等实时数据,对电网设备运行状态、客户实时信息反馈进行跟踪,对停电计划的执行情况进行综合研判和分析。

在停电过程管控方面,根据调度自动化、配电自动化系统实现对配电网 10 kV 主馈线、分段线路和分支线开关分合闸情况的监控,将开关分合闸时间与计划停电时间比对,核实计划停电相关的开关操作是否已按计划执行。同时在系统中设定停电未送电时间阈值、超计划送电时间阈值,对即将超过阈值的停电信息进行预警,并通过短信对服务人员进行提醒。对已超过阈值的停电信息,通过短信通知服务人员,再由服务人员主动联系客户进行告知、解释原因。

在执行结果分析方面,通过 95598 客户停电报修记录、客户投诉工单分析是否存在客户实际停电时间与计划停电公告时间具有较大差异的情况,对因未严格执行停电计划,引起客户不满或投诉的单位和部门进行考核。

5 结 语

通过对海量配电网实时运行数据以及业务数据的挖掘应用,对现有的配电网停电分析与管理工作进行扩展和完善。相比过去,停电信息编译和发布方式更智能,能够更精准地服务于用电客户;停电计划管控手段更精细,能够更全面监督停电计划的执行情况。

参考文献

[1] 荆浩. 大数据时代商业模式创新研究[J]. 科技进步与对策,2014, 31(7):15-19.

[2] 宋亚奇,周国亮,朱永利. 智能电网大数据处理技术现状与挑战[J]. 电网技术,2013,37(4):927-935.

[3] 崔海福,何贞铭,王宁. 大数据在石油行业中的应用[J]. 石油化工自动化,2016, 52(2):43-45.

[4] 彭英,万剑华,吴楠. 一种基于云计算的分布式油田物探数据存储与服务平台[J]. 计算机研究与发展,2011(1):224-228.

[5] 刘科研,盛万兴,张东霞,等. 智能配电网大数据应用需求和场景分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2):287-293.

[6] 赵腾,张焰,张东霞. 智能配电网大数据应用技术与前景分析[J]. 电网技术, 2014, 38(12):3305-3312.

[7] 梁建宾,黄绍辉. 大数据下的智能配网的发展研究[J]. 信息化建设, 2016(11):98-98.

[8] 肖祥. 探析智能配电网大数据应用技术与前景[J]. 电脑编程技巧与维护, 2016(12):59-60.

[9] 张沛,吴潇雨,和敬涵. 大数据技术在主动配电网中的应用综述[J]. 电力建设, 2015, 36(1):52-59.

[10] 王璟,杨德昌,李锰,等. 配电网大数据技术分析与典型应用案例[J]. 电网技术, 2015, 39(11):3114-3121.

[11] 张东霞,王继业,刘科研,等. 大数据技术在配用电系统的应用[J]. 供用电, 2015, 32(8):6-11.

[12] 苗新,张东霞,孙德栋. 在配电网中应用大数据的机遇与挑战[J]. 电网技术, 2015, 39(11):3122-3127.

[13] 于永军,祁晓笑,南东亮,等. 大数据在配电网低电压评估中的应用[J]. 电气技术, 2015, 16(10):92-94.

[14] 李占英,李玉栋,刘丰年. 配电网低电压评估中大数据的应用探究[J]. 山东工业技术, 2017(12):209-209.

[15] 陆巍. 基于大数据的配电网线损分析[J]. 电子技术与软件工程, 2017(14):186-188.

[16] 徐祥征,王师奇,吴百洪. 基于大数据分析的配电网主动检修业务应用研究与实现[J]. 科技通报, 2017, 33(6):105-108.

[17] 李蓉,张亮,冯国礼. 基于大数据分析的配电网停电数据管理平台[J]. 宁夏电力, 2017(2):62-65.

作者简介:

谭文(1989),工程师,从事营销业务质量监督、客户优质服务等电力营销服务管控相关工作;

杨雪梅(1987),工程师,从事电网运行方式安排、保护定值计算等电力系统调度相关工作;

叶敏(1976),助理工程师,从事客户故障报修、非抢修单接派等95598客户服务业务管理工作;

李智(1987),博士、高级工程师,从事电压无功优化控制、电力系统二次设备检修、配电网建设及运行管控相关工作;

唐朝(1984),工程师,从事配电运检分析管理、配电网自动化管理等工作;

张禹(1985),工程师,从事配电网运维检修管理工作;

曾娜(1987),工程师,从事配电网生产技改大修项目管理工作;

李卓雯(1986),硕士、工程师,从事配电网运检计划管理工作。

(收稿日期:2018-06-13)

[9] 韩小雷. 粒子群——模拟退火融合算法及其在函数优化中的应用[D]. 武汉:武汉理工大学,2008.

[10] 麻秀范,丁宁,李龙. 配电网重构中网络辐射形与连通性的判断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8):289-293.

[11] 孙惠娟,彭春华,袁义生. 综合开关次数分析的配电网多目标动态重构[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9):41-46.

[12] Zhu Jizhong, Xiong Xiaofu, Hwang D, et al. A Comprehensive Method for Reconfiguration of Electrical Distribution Network [C] // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007, Tampa, FL, USA: 1-7.

[13] 周淦,张冠军,李剑,等. 基于化整为零策略和改进二进制差分进化算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2012, 36(3):197-203.

[14] 王淳,易水平,刘建国. 配电网重构的食物链生态进化算法[J]. 高电压技术, 2009, 35(11):2858-2864.

作者简介:

张珂(1990),硕士研究生,主要从事配电网自动化方向的研究。

(收稿日期:2018-05-25)

(上接第4页)

[3] 赵嘉玉,韩肖清,梁琛,等. 隶属函数与欧氏距离相结合的配电网优化重构[J]. 电网技术,2017,41(11):3624-3631.

[4] 李亚男,张靠社,张刚,等. 基于改进和声搜索算法的配电网多目标综合优化[J]. 电网与清洁能源,2017, 33(6):82-86.

[5] 范心明,陈锦荣,吴树鸿,等. 离散学习优化算法在含分布式电源的配网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(8):156-163.

[6] 程虹,高元海,王淳,等. 基于无重访NSGA-II算法的配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制,2016, 44(23):10-16.

[7] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization [C]. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995: 1942-1948.

[8] Eberhart R, Kennedy J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory [C]. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 1995: 39-43.

• 9 •

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 澍, 宋全林, 杨 夏
(国网四川省电力公司天府新区供电公司, 四川 成都 610041)

摘 要:以一起 35 kV 线路单相接地演变为异名相两点接地短路故障, 最终引起主变压器跳闸故障为实例, 通过站内故障录波波形分析, 进而推测故障点及演变形式。通过故障电流及已知参数测算线路故障点范围, 提高了线路故障点排查效率, 对同类型故障分析有一定参考意义。

关键词:异名相两点接地; 故障演变; 故障点排查

中图分类号:TM771 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)05-0010-04

Analysis on A Two Points Ground Fault Occurred in Different Phases of Small Current Grounding System with Two Power Supply

Zhu Fengjuan, Yao Yuanwen, Chen Lian, Song Quanlin, Yang Xia
(State Grid Tianfu New Area Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: A case is introduced that a single-phase grounding in 35 kV line develops two points ground fault occurred in different phases, which causes a transformer to be cut off. In order to find the fault point and its evolution, the waves of current and voltage recorded in substation when the fault happened are analyzed. The fault range is calculated with the fault current and the known parameters, which improves the efficiency of fault detection and provides some references for fault analysis of the same kind.

Key words: two points ground fault; fault evolution; fault detection

0 引 言

中国 3~66 kV 配电网一般采用中性点不接地或经消弧线圈接地等非有效接地方式, 也叫小电流接地系统。^[1-3] 发生单相接地故障时, 非故障两相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍而线电压不变, 故不影响三相设备的正常运行。此种接地方式提供了高供电可靠性, 然而系统带单相接地故障运行过程中, 可能产生异常过电压, 发生铁磁谐振时过电压值可达到相电压的 4 倍, 发生间隙性弧光接地时有可能达到相电压值的 3.5 倍^[3-6]。异常过电压可能引起其余两相在绝缘薄弱处相对地绝缘击穿, 形成不同地点的异名两相接地。下面就一起 35 kV 线路短时单相接地引起异名相两点接地短路, 导致主变压器跳闸故障实例进行分析, 对同类型故障分析有一定参考意义。

1 故障概要

故障分析数据显示, 2018 年 3 月 16 日 23:12:36, 某 110 kV 变电站 1 号主变压器比率差动保护动作, 跳开主变压器三侧开关。同时, 35 kV 线路一断路器 352 速断保护跳闸, 重合闸动作成功, 并报主变压器差动保护动作信号、线路速断保护动作信号、事故总信号。

2 系统运行方式

保护动作前, 某 110 kV 变电站运行方式如图 1 所示, 全站由 110 kV 甲电源线主供, 乙电源线热备用。高、中压侧并列运行, 低压侧分列运行, 低压侧投入分段备自投, 高压侧投入进线备自投。X 发电

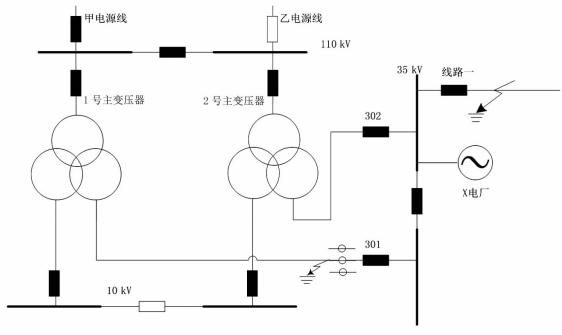


图 1 某 110 kV 变电站运行方式
厂经 35 kV 母线发电上网。

3 保护配置及定值

35 kV 线路一(变比 600/5)配置三段式电流保护(ISA-367G), 瞬时速断 3600 A, 0 s; 限时速断 1200 A, 0.3 s; 定时限过流 480 A, 1 s, 重合闸时限 2 s。1 号主变压器配置差动保护(PCS-9671D-D)6I_e, 比率差动 0.5(制动系数)。

4 故障过程分析

故障当日该站所在区域小雨, 环境温度 13 ℃ ~ 22 ℃, 无持续风向微风。故障发生时该站并无操作。

4.1 现场查勘情况

经现场运维人员停电检查发现 1 号主变压器 35 kV 开关柜 B 相 CT 炸裂, C 相有较轻微的放电痕迹。B 相 CT 灼烧炸裂痕迹如图 2。



图 2 1 号主变压器 35 kV 侧 B 相 CT
进一步检查结果如下:

1) 如图 2, 从 1 号主变压器 35 kV 侧 B 相 CT 故障照片看, CT 浇注工艺控制不当。CT 内部存在多处气隙, 且内部导体焊接处表面不光滑, 未采取电场屏蔽处理措施, 内部导体处附近的环氧树脂变色严重(图 2 中圆圈部分), 疑似内部长期局部放电的结果。

2) 调取故障录波装置波形如图 3、图 4。图 3 中, A 点为 35 kV 某处疑似发生 B、C 相接地短路的时刻, B 点为线路一故障跳闸的时刻, C 点为 35 kV 某处发生 B、C 相间短路的时刻, 在 D 点时发展为三相短路, E 点为 1 号主变压器差动保护动作跳三侧开关时刻。图 3 中 F 点和图 4 中 T₃ 时刻为线路一重合时刻。

4.2 故障原因分析

根据故障时序及演变将故障过程划分成 5 个阶段分析^[7-10]。

1) 故障第 1 阶段: 结合图 4、图 3 AB 段分析, 35 kV 系统某处疑似发生 B、C 相接地短路时, 两图电压波形一致(均采用母线 PT 电压), 但故障电流不一致。35 kV 线路一仅 C 相有故障电流, 但 1 号主变压器 301 断路器有 B、C 相故障电流大小相等且方向相反, 符合相间短路特征。

由于 35 kV 电网为中性点不接地系统, 单相接地故障时不应有故障电流, 可以推测系统发生了 B、C 相间故障。但故障电流没有流过线路一 B 相 CT, 仅流过了线路一 C 相 CT。由此推测 C 相故障点在线路一断路器保护区内, B 相故障点在线路一断路器保护区外。

另外, 系统仅有 A 相电压接近线电压, B 相电压几乎为 0, C 相接近相电压, 推测系统近母线 D 处发生 B 相接地、同时系统远母线 P 处发生 C 相接地, 即发生了不同地点两相接地故障。

① 计算母线至故障点线路阻抗

分析故障第 1 阶段双电源系统两点接地电流流向示意如图 5, 对该故障电流进行全电流建模如图 6。

将 1 号变压器作为电源 $\dot{E}_I$, X 电厂作为电源 $\dot{E}_{II}$ 。为简化计算, 假设两侧电势相等, 即 $\dot{E}_I = \dot{E}_{II} = \dot{E}$; 正、负序阻抗相等, 即 $Z_1 = Z_2$; D、P 两点故障为金属性接地, 过渡电阻为 0; R_p 为母线至故障点线路阻抗。由于故障电流远大于负荷电流, 因此计算时忽略负荷电流的影响。

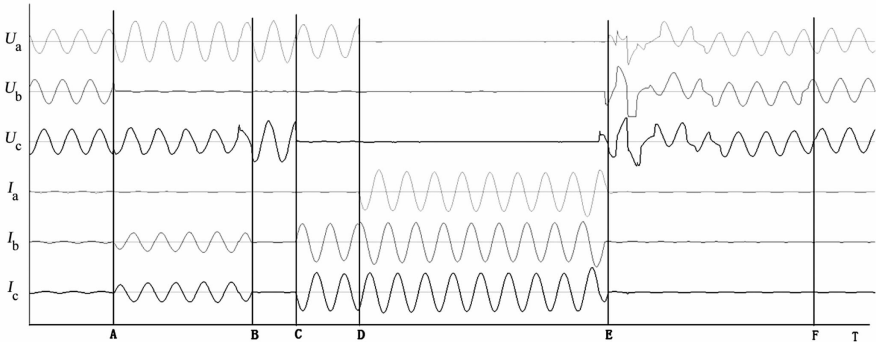


图3 1号主变压器中压侧开关电压、电流波形局部放大

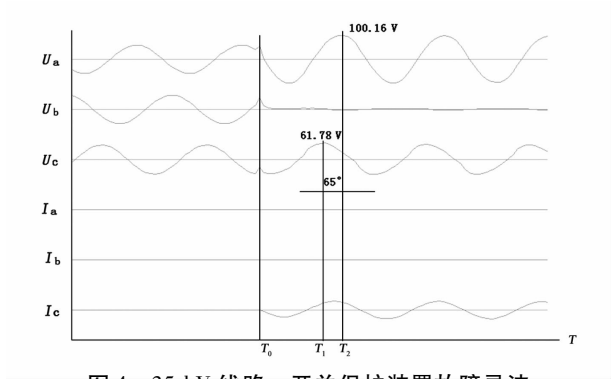


图4 35 kV 线路一开关保护装置故障录波

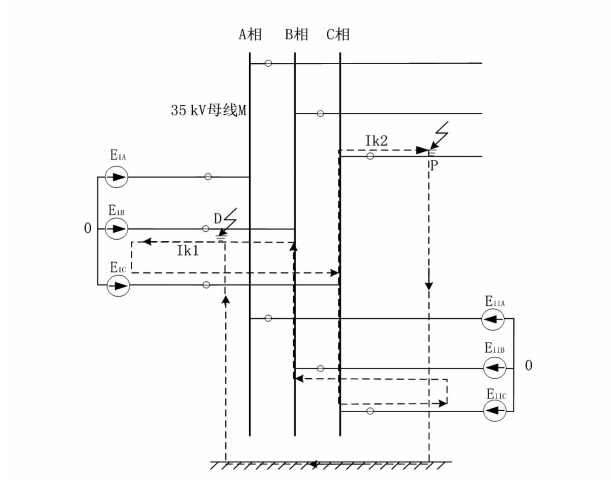


图5 双电源35 kV 系统两点接地电流流向

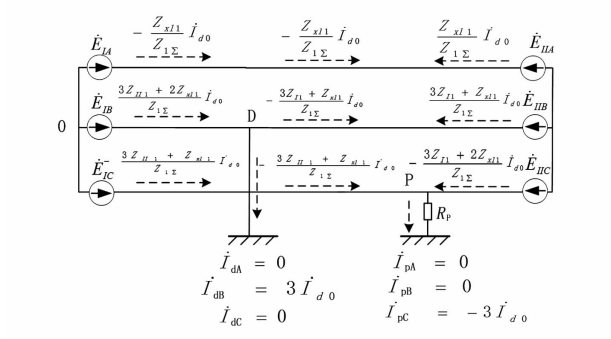


图6 双电源35 kV 系统两点接地全电流分布
已知大系统供电至35 kV 母线M 阻抗为

$Z_{II} = j0.197\ 80$ (1)

X 电厂小系统阻抗为

$Z_{II1} = j0.700\ 53$ (2)

35 kV 母线M 至X 电厂母线正序阻抗为

$Z_{xI1} = j0.075\ 35$ (3)

零序阻抗为

$Z_{xI0} = 3.5Z_{xI1}$ (4)

根据现场采集数据,将已知条件代入。用基准电流 I_j 代替 $\dot{E}_c$ ($\dot{E}_c$ 标幺值取 $1\angle0^\circ$),则通过D 点零序电流有名值可以求出线路故障点 R_p 。另外,

$\dot{I}_{pc} = -3\dot{I}_{d0} = 4008\ \text{A}$ (5)

$$\begin{aligned} Z_{1\Sigma} &= Z_{xI1} + Z_{I1} + Z_{II1} \\ &= j0.197\ 80 + j0.700\ 53 + 0.075\ 35 \\ &= j0.973\ 68 \end{aligned}$$
 (6)

$$\begin{aligned} Z_{II}Z_{xI1} + Z_{II1}Z_{xI1} + 3Z_{I1}Z_{II1} &= j0.197\ 8 \times \\ &\quad j0.075\ 35 + j0.700\ 53 \times j0.075\ 35 + 3 \times \\ &\quad j0.197\ 80 \times j0.700\ 53 = -0.483\ 378 \end{aligned}$$
 (7)

则,根据公式^[11],

$$\begin{aligned} \dot{I}_{d0} &= -1336 \\ &= \frac{-j\sqrt{3}\dot{E}_c}{2\frac{Z_{II1}Z_{xI1} + Z_{II1}Z_{xI1} + 3Z_{I1}Z_{II1}}{Z_{1\Sigma}} + Z_{xI0} + 3(R_d + R_p)} \\ &= \frac{-j1.732 \times 1560}{2 \times \frac{-0.483\ 38}{j0.973\ 68} + j0.263\ 73 + 3 \times R_p} \end{aligned}$$
 (8)

所以计算得

$R_p = j0.255\ 26$ (9)

②通过计算电压验证计算结果

$$\begin{aligned} \dot{U}_{dA1} &= \dot{E}_{1A} - \dot{I}_{1A1}\dot{Z}_{II} = \dot{E}_{1A} - \frac{aZ_{xI1} + j\sqrt{3}Z_{II1}}{Z_{1\Sigma}} \\ &= 0.777\ 56 - j0.006\ 55 \end{aligned}$$
 (10)

$$\begin{aligned} \dot{U}_{dA2} &= 0 - \dot{I}_{1A2}\dot{Z}_{I2} = -\frac{a^2Z_{xI1} + j\sqrt{3}Z_{II1}}{Z_{1\Sigma}} \\ &= 0.222\ 44 - j0.006\ 55 \end{aligned}$$
 (11)

$$\begin{aligned} \dot{U}_{d0} &= -a^2 E_{1A} + \frac{2Z_{x1l} + 3Z_{11}}{Z_{1\Sigma}} Z_{11} \dot{I}_{d0} \\ &= 0.5 + j0.474\ 15 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{dA} &= \dot{U}_{dA1} + \dot{U}_{dA2} + \dot{U}_{dA0} = 1.5 + j0.461\ 05 \\ &= 1.569\ 26 \angle 17^\circ \end{aligned} \quad (13)$$

$$\dot{U}_{dB} = a^2 \dot{U}_{dA1} + a \dot{U}_{dA2} + \dot{U}_{dA0} = 0 \quad (14)$$

$$\dot{U}_{dC} = a \dot{U}_{dA1} + a^2 \dot{U}_{dA2} + \dot{U}_{dA0} = j0.961\ 43 \quad (15)$$

通过计算得出 A 相电压有效值为 1.569 26 倍基准电压,换算成二次值为 90.66 V,与图 4 中 T_2 时刻 U_a 读数 100.16 V 相差 9.48%。计算得出 C 相电压有效值为 0.961 43 倍基准电压,换算成二次值为 55.54 V,与图 4 中 T_1 时刻 U_c 读数 63.5 V 相差 12.53%。A、C 相电压计算值与采集值偏差均 10% 左右,因此判定该次母线至故障点线路阻抗计算结果 R_p 有效。

③故障点距离测算

35 kV 线路—37 基杆塔共 7.62 km,线路参数为:1-9 基杆塔导线型号为 JL/G1A-120/25,长 1.377 km;9-17 基杆塔导线型号为 LGJ-95,长 1.533 km;17-37 基杆塔导线型号为 LGJ-35,长 4.64 km。该线路并无实测阻抗参数,经估算^[12]全线路阻抗 $Z_l = j0.429\ 28$ (忽略电阻)。

$$R_p/Z_l = \frac{j0.255\ 26}{j0.429\ 28} = 0.594\ 6 \quad (16)$$

通过式(16)估算故障点在线路中后段。计及计算过程中假设两点故障过渡电阻为 0 等简化处理,且计算结果存在一定误差,所以运行单位重点巡视了 17-25 基杆塔区段。经巡视发现 19-20 基杆塔间 C 相导线弧垂过大,不满足安全距离,极可能故障发生时对周边树枝放电接地。

2)故障第 2 阶段:图 3 B 点时刻,35 kV 线路一跳闸;图 3 BC 段故障电流消失,电压电流呈现小电流接地系统单相接地典型特性。推测此时 35 kV 线路—上 C 相接地故障与系统隔离。

3)故障第 3 阶段:图 3 C 点时刻,单相接地故障再次演变为同一地点两相接地短路故障,如图 3 CD 段所示。

4)故障第 4 阶段:图 3 D 点时刻,两相接地短路故障演变为三相接地短路,如图 3 DE 段所示。图 3 的 E 点时刻主变压器差动保护动作,切除 1 号主变压器三侧开关将故障点隔离。

5)故障第 5 阶段:图 3 中 E 点时刻故障点切除

后,35 kV 系统电压受到扰动,电压波形逐步恢复。图 3 F 点时刻线路一重合闸动作成功,系统恢复到新的稳定状态。

4.3 结论

1 号主变压器 35 kV 开关柜 B 相 CT 浇注工艺控制不当是导致主变压器跳闸发生的主要原因,该设备在 35 kV 线路—19-20 号杆塔段 C 相导线瞬时接地时,发生了主绝缘击穿接地故障。系统形成了 B、C 相两点短路接地,线路故障隔离后该故障点迅速演变为两相接地短路,最后演变为三相接地短路故障。

5 结 语

规程规定,对于小电流接地系统,单相接地故障可以坚持运行 2 h 排查故障。此时非故障两相对地电压升高为线电压,很可能在绝缘薄弱的某处发生绝缘击穿导致两点接地短路故障。通过故障案例分析,针对小电流接地系统接地故障有如下结论和建议:

1)对比两点接地短路和两相接地短路故障,非故障相电压均接近线电压。前者故障点距母线越远故障相母线电压越高,故障点距母线越近故障相母线电压越低。所提案例其中一个故障点在站内 CT 处,所以该相母线电压接近于 0,而后者则是故障两相母线电压一致。

2)生产厂家应严格管控 CT 等设备生产过程质量,尤其是绝缘处理工序等的质量控制。同时运行单位也应加强入网检测和对运行设备的巡检和试验,防止互感器故障发展为电网事故。

3)为了提高供电可靠性,对于经过山区的线路运行单位应该定期组织巡视,及时清理通道,尽量减少接地故障发生和故障演变。

参考文献

- [1] 赵冉,谭伟璞,杨以涵.配电网中性点接地方式分析[J].电力系统保护与控制,2007,35(4):22-26.
- [2] 李润先.中压电网系统接地实用技术[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [3] 王苏,曾铁军,郑茂然.中性点非有效接地电力系统异相两点接地短路时的选择性跳闸决策[J].电网技术,2010,34(7):195-199.

(下转第 21 页)

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

(国网四川省电力公司遂宁供电公司,四川 遂宁 629000)

摘要:配电线路基本实现了手拉手供电后,通过合解环操作可以实现不停电负荷转移,该环节有效提高了供电可靠性。但是,合解环操作后的系统运行状态未知,使得该操作承载一定风险。应用辅助分析系统,希望有效地减少合解环的盲目性,提高不停电负荷转移的成功率,进而提高供电可靠性,使配电网的运行管理更加可靠、合理、高效。

关键词:智能配电网;合解环;自动化;决策分析

中图分类号:TM71 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)05-0014-08

Research on Decision Analysis of Closing and Breaking Loop Based on Distribution Automation

Cui Jingshun, Yang Huoping, Yu Weidong, Yu Xiang

(State Grid Suining Electric Power Supply Company, Suining 629000, Sichuan, China)

Abstract: After the distribution line is basically realized by hand-in-hand power supply, the uninterrupted power load can be transferred through the closing and breaking loop operation, which effectively improves the reliability of power supply. However, the operating state of the system after closing and breaking loop operation is unknown, which makes the operation bear certain risks. The auxiliary system analysis is applied to effectively reduce the blindness of closing and breaking loop and improve the success rate of the uninterrupted power load transfer, and then to improve the reliability of power supply, which make the operation and management of distribution network more reliable, reasonable and efficient.

Key words: smart distribution grid; closing and breaking loop; automation; decision analysis

0 引 言

配电运行是智能电网中连接主网和面向用户供电的重要组成部分,但又是目前装备较薄弱的环节。随着农网改造的深入,大部分线路已实现双电源供电,一般采用闭环设计、开环运行的供电方式。当系统发生故障或者计划检修时,通过合解环操作实现不停电负荷转移是提高配电网供电可靠性的有效措施,是配电网自动化的重要应用。由于合解环操作后的系统负荷是未知的,因此合解环操作对电力系统来说,存在潜在的危险性。

合解环操作可以大幅度地减少停电时间,在提高供电可靠性的同时,又保证了电网供电的灵活性;但另一方面,合解环操作对电网的稳定运行也有很大的影响。合环点两侧的电压矢量差在合

环瞬间消失,由此产生的合环稳态电流及冲击电流可能引起线路过载或保护误动作;解环后负荷的突然增加,馈线末端电压过低也会影响供电质量,严重时甚至造成导线变形、电气设备损害,导致合环操作失败,造成大面积的停电事故,直接影响电网的稳定安全运行。正是由于合解环操作后配电网运行状况的不确定性,大多数供电公司仍采用“先断后通”的冷倒方式进行负荷转移,这样势必会造成用户停电次数增多、停电时间加长,严重影响供电可靠性。与此同时,现有的配电自动化(distribution automation, DA)工作应用水平较低,没有发挥应有的作用,合解环操作可行性大都依赖调度人员的经验判断,造成不停电负荷转移操作的安全性得不到保证,大大限制了其作用的发挥。因此,迫切需要一个辅助决策分析软件来协助调度人员调度运行。

1 系统研究的理论背景与现实基础

1.1 合解环操作潜在危险性分析

由于合解环操作存在潜在的危险性,且对于大部分地区配电网来说还缺乏有力的理论依据和分析软件来指导这种操作,所以不停电负荷转移操作的安全性得不到保证,限制了其作用的发挥^[1-2]。配电网合环操作示意图如图1。

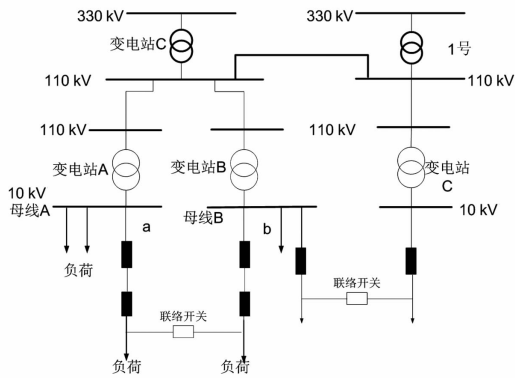


图1 配电网合环操作示意

如图1所示,变电站A与变电站B同属于上级变电站,母线A的10 kV馈线与母线B的10 kV馈线实现了手拉手供电。当母线A发生故障或者计划检修时,可通过合解环操作,将母线A上的全部或部分负荷转移到母线B上,以保证用户的不间断供电。

由于合环前,出线a、b由不同的母线供电,a、b负荷分布不同,那么在合环点两侧势必存在一定的电压差。而经过合环操作,合环点两侧为等电位,合环瞬间电压差消失,该电压差将产生一个合环环路电流,合环环路电流与线路负荷电流叠加,形成合环稳态电流。若合环稳态电流过大,可能引起过流保护误动作。而在合环瞬间,合环点两侧的电压差发生突变,这个暂态过程也将产生一个冲击电流,若冲击电流过大,或冲击电流的衰减常数未躲过速断保护的延时时间,将引起速断保护的误动作。

解环开关解环后,原母线A所带的全部或部分负荷转由母线B单端供电,流经母线B及相关馈线的负荷电流突然增大且末端电压降低,也可能引起供电质量的下降和保护误动作^[3]。

1.2 县级电网配电自动化配置特点

中国配电网网架结构基础比较薄弱。但近年来随着农网改造的深入,配电网的规模持续增长,网架结构得到了加强,为建设配电自动化提供了

良好的基础。与此同时,中国从20世纪90年代开始大力推进配电自动化的试点工作,经过十多年的发展,配电自动化水平有了长足的进步。部分城市配电管理系统的建设涵盖了地理信息系统、生产管理系统,并实现了与配电监控系统、企业资源规划等系统的接口,初步建成了智能电网的公共支撑平台。

但是从配电网自动化的实施现状来看,目前主要有以下问题:配电自动化应用范围小,实用化水平低;缺乏统一的标准体系,存在重复建设;信息孤岛众多,信息集成度低;生产管理与企业管理系统联动较弱,信息集成与共享存在壁垒^[4]。而县级电网在网架结构、设备投入和自动化实施水平上更为落后。

2 S县电网自动化的现状及数据分析

截至目前,S县供电分公司实现了县域基本配电自动化,全县户通电率达到了100%,农网改造面积达到了98%。S县城区3条主干线路,都已实现配网线路自动化,并都已经实现手拉手供电,甚至出现了多条互供的情况,为带电倒负荷提供了可能性。

S县供电公司现有2套采集变电站数据的系统和1套配电自动化系统,分别为四方华能CSCD2000S县级调度自动化系统、南京华瑞杰HRJ9200远程无线监测系统和西安兴汇TAS-2000配电线路故障诊断及运行监控系统。

2.1 变电站数据采集系统

四方华能电网调度自动化系统,是具有统一支撑平台的调度数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)、高级应用软件、馈线自动化(feeder automation, FA)以及基于地理信息系统的配网管理的新一代调度自动化系统。系统配置灵活,具有很强的通用性、兼容性和扩展性,可提供除S县某110 kV变电站外的各变电站的一次接线图、系统运行工况(5 s采集一次)及简单潮流计算结果,见图2。

南京华瑞杰远程无线监测系统,可提供S县某110 kV变电站9回出线的相关遥信、遥测量,包括开关状态、三相线电压、三相电流、有功负荷、无功负荷等数据,无线监测系统见图3。

2.2 配电线路运行监控系统

配电运行监控系统是通过馈线终端(feeder -

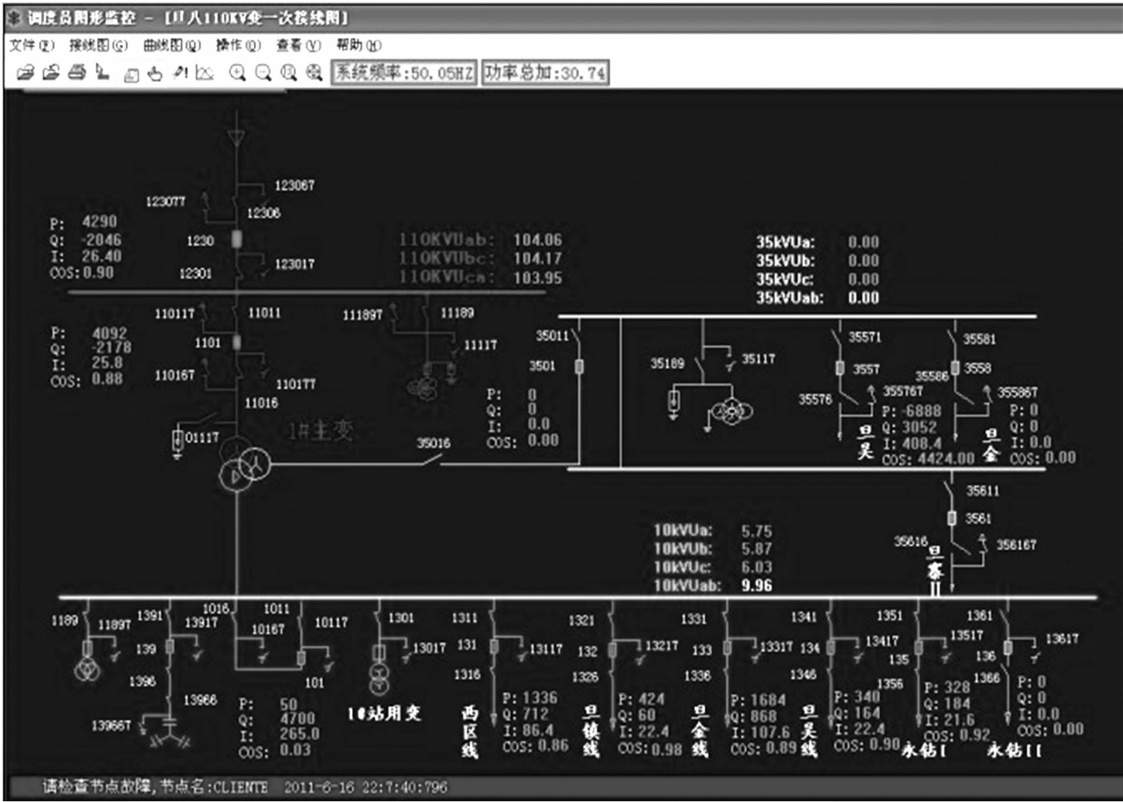


图 2 县调自动化系统

馈线	终端	模拟量时标	Uab	Ubc	Ia	Ib	Ic	Px	Qx	状态量时标	Yx1	Yx2	工况
141志新线	141志新线	2011-11-10 02:01:00	0	0	0	0	0	0	0	2011-11-10 01:59:50	分闸	分闸	退出
143志城I线	143志城I线	2011-11-15 10:34:00	9890	9870	193.6	182.4	181.6	3111.2	722.4	2011-11-15 10:28:52	分闸	分闸	投入
145志城I线	145志城I线	2011-11-15 10:34:00	10250	10270	53.6	53.6	56	933.6	282.4	2011-11-15 10:28:50	分闸	分闸	投入
146志城I线	146志城I线	2011-11-15 10:34:00	10330	10300	220	224.8	220	3916	566.4	2011-11-15 10:28:51	分闸	分闸	投入
147志城I线	147志城I线	2011-11-15 10:34:00	10330	10300	100.8	100	87.2	-1665.6	-440	2011-11-15 10:28:51	分闸	分闸	投入
149志宁	149志宁	2011-11-15 10:34:00	10310	10270	216	216	212	3246.4	1984.8	2011-11-15 10:28:51	分闸	分闸	投入
153武沟	153武沟	2011-11-15 10:34:00	10300	10340	8.8	8.8	8.8	167.2	-4	2011-11-15 10:28:50	分闸	分闸	投入
154志台	154志台	2011-11-15 10:34:00	9820	9860	196.8	201.6	200	2850.4	1797.6	2011-11-15 10:28:51	分闸	分闸	投入
155志康	155志康	2011-08-31 08:28:35	0	0	0	0	0	0	0	2011-08-31 08:28:35	分闸	分闸	退出

图 3 S 县远程无线监控系统

terminal unit, FTU) 在线采集线路负荷电流、单相接地故障及相间短路故障信息, 通过移动公网 GSM/GPRS 将检测数据上传至软件管理系统, 在线掌握线路运行状态、远程控制断路器的分合, 当发生单相接地或相间短路故障时, 可将故障区段隔离或切除。该系统主要由配电自动化管理系统和前端采集装置两部分组成。

配电自动化管理系统, 主要用于接收、分析处理线路上各 FTU 发回的在线检测数据, 实时监控线路的运行状况, 分合断路器进行负荷调控。当发生线路短路故障时, 系统可快速确定故障区段, 并远程控制 FTU 隔离或切除相应故障区段。

前端采集装置安装在馈线分段开关处, 由前端装置、直流源、高压取电单元和通讯单元四部分组成, 具有遥信、遥测、遥控和故障电流检测功能, 实时监测配电线路运行状况, 并将检测数据及故障信息(短路、单相接地等故障) 发送到软件管理系统。

3 基于现有信息平台的潮流算法研究

对县级配电网来说, 配电网自动化的实施水平不高, 在进行合解环决策在线分析时, 很难从地方调度中心获得整个系统的所有实时信息, 且系统实时潮流计算的需求并不能满足, 因此应结合 S 地区电

网特点,建立合解环操作的简化模型,提出可采用的合环稳态电流、合环冲击电流、解环负荷电流、解环末端电压的计算方法。

3.1 基于叠加原理的合环稳态电流的计算

配电网一般采用闭环设计、开环运行的网络结构,系统正常运行时,网络结构成辐射状,系统发生故障或者检修时,才会出现短暂的环网运行。对于环形配电网的处理,很多专家学者提出了不同解决方案,其基本思想都是解开环网,将环网转化为辐射型的常规网络,其中叠加法是常用的一种处理方法^[5-6]。

叠加法将合环运行看做在开环运行的两端叠加一个电压源,大小与开环点两侧的电压差相等,方向相反,将合环运行分解为开环运行和含有一个电压源的附加分量。根据叠加定理,合环后的网络等效于合环前的辐射型有源网络和含电压源的等值环状网络的叠加。那么,合环后各支路的稳态潮流可以认为是由两部分叠加而成:一部分是合环前辐射型网络各支路的初始潮流;另一部分是由合环开关两端电压矢量差引起的循环潮流。

基于叠加原理的合环稳态电流不需要进行合环后的潮流计算,只需要合环前的潮流计算结果就可求出合环稳态电流的大小。环网阻抗 $Z_{\text{环}}$ 采用工程上的近似计算方法,近似等于涉及合环线路中的变压器及线路阻抗之和。

3.2 冲击电流及解环潮流的计算

合环瞬间,合环点两侧的电压差消失,将产生一个暂态的冲击电流,因此合解环决策分析过程中,不仅需要分析校验合环稳态电流,还需考虑合环瞬间的暂态过程,研究冲击电流是否造成设备速断保护越限^[7]。

冲击电流是合环暂态过程中出现的合环电流的最大瞬时值,幅值大且持续时间短。正常情况下系统三相对称运行,因此对冲击电流的分析只需建立单相等值模型^[8]。

负荷转供后,调度人员在进行网络拓扑分析基础上,应尽快进行解环操作,恢复网络的辐射状结构,且在恢复的过程中不允许出现设备过载或电压过低的现象。

在现有数据采集条件下无法得到线路负荷的精确分布,大多数地区 SCADA 系统无法采集到配电网的配电变压器负荷情况,而只能采集到变电站 10 kV 出线负荷。为适应现有状况,在计算解环后线路

电流时,将负荷集中于几个负荷点,也可根据这些主要负荷点的位置建立配电网负荷模型,进行解环后线路电流的计算。

4 合解环决策分析软件的实现

配电网合解环决策分析系统,是在现有智能配电网信息平台的基础上对合解环后系统潮流进行分析,进而辅助调度人员进行合解环决策分析。根据前面对系统的研究,在 Visual Graph 和 SQL Server 环境中开发了基于 Windows 操作系统的可视化合解环决策分析软件。

下面对 S 县 10 kV 配电网系统进行合解环决策分析。S 县城区志新线和志城干线经志新干线 70 号联络开关实现手拉手供电,为不停电合解环操作提供了现实条件。在该系统中,两条 10 kV 母线隶属于同一 110 kV,且母线电压相当,所以在计算中将两条 10 kV 母线视为同一节点,并将其以上的主网部分视为无穷大系统。系统建模见图 4。

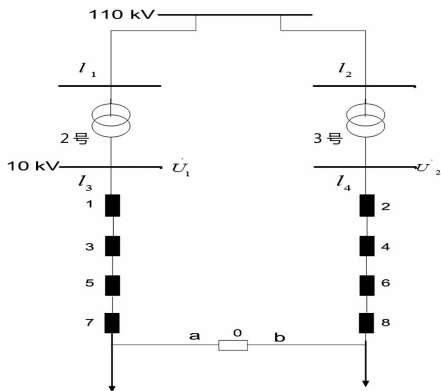


图 4 系统建模

对合解环过程进行潮流计算时,需要用到以下数据:

1) 变电站名称、主变压器参数(折算到 10 kV 侧)和分接头位置。

$$Z_T = R_T + jX_T = \frac{P_K U_N^2}{1000 S_N^2} + j \frac{U_K \% U_N^2}{100 S_N}$$

式中: P_K 为变压器空载损耗; $U_K \%$ 为短路电压百分比; S_N 为变压器额定容量; U_N 为折算侧额定电压(10 kV)。

2) 线路参数,包括线路名称、线路型号、长度、载流量。

$$Z_l = (r + jx)l$$

行,10 kV 联络线路与上级网络的联络途径如图 5 所示。

- 3) 馈线分段开关的名称、开关状态。
- 4) 出线出口开关及馈线分段开关的保护整定值,包括过流保护整定值、速断保护整定值。
- 5) 合环前出线出口开关及馈线分段开关处的负荷电流大小。
- 6) 合环前合环点两侧的电压矢量差。

4.1 合解环系统接线

涉及本次合解环操作的志新线和志城线分别隶属于 S 县某 110 kV 变电站的 1 号和 2 号主变压器。1 号主变压器容量为 31.5 MVA, 2 号主变压器容量为 40 MVA。在合解环操作前, 通过投切电容调整两侧 10 kV 母线电压, 并适当调整合环点两侧的负荷大小和功率因数, 使合环点两侧压差不至过大, 导致合解环操作失败。

4.2 合解环决策分析过程

操作向导中采用变电站-线路-合解环点三级选择,选择合解环线路及合解环开关,并进行自动拓扑遍历,自动判断存在可执行操作的合环开关,并将其拓扑进行高亮显示。这对操作者有了一定的指导意义,通过最合理的合解环方式,实现故障线路的隔离和治愈。合解环线路、开关的选择如图 6 所示。

所选合解环线路、合解环开关存在合环环路,进入开关通讯状态检查、所有监测点 FTU 召回数据,各监测点数据反馈正常,因此判断 FTU 通信正常,进入相序检查。FTU 反馈的数据包括设备安装地点、杆塔号、开关状态、三相负荷电流、c 相相电压等。前端装置通信状态监测及合环点相序状态检测分别见图 7、图 8。

分别见图 7、图 8。

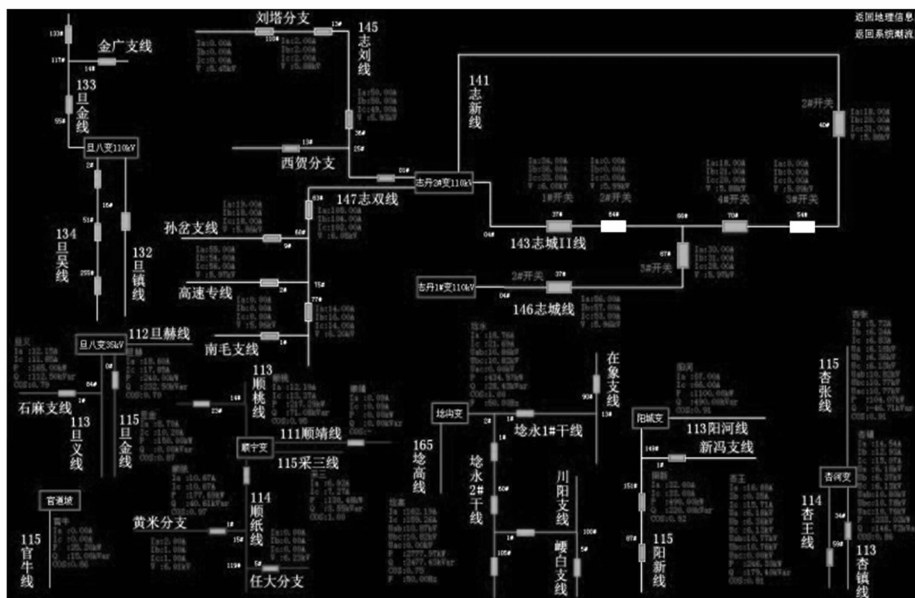


图 5 系统接线

不押电负荷转移操作向导		不押电负荷转移操作向导	
选择合解环线路		选择合解环点	
请选择需要进行负荷转移的线路。		选择合适的合解环点进行负荷转移，请先选择合环点开关位置。	
变电站 I : 炼沟变 顺子变 110kV志丹变	线路 I : 145志城线 141志新线 147志双钱 145志刘线 143志城线	所选的合环点开关: 1659_志城线志城干钱-70#-	1659_志城线志城干钱-70#-
合环线路信息: 110kV志丹变——146志城线			
变电站 II : 炼沟变 顺子变 110kV志丹变	线路 II : 146志城线 141志新线 147志双钱 145志刘线 143志城线	所选的解环点开关: 1658_志新线志新干钱-54#-	1654_志城线志城干钱-37#- 1656_志城线志城干钱-67#- 1658_志新线志新干钱-54#- 1657_志新线志新干钱-40#-
解环线路信息: 110kV志丹变——141志新线			
提示信息:		提示信息:	
下一步(N)> 取消(C)		上一步(B)< 下一步(N)> 取消(C)	

图 6 合解环线路、开关的选择



图 7 前端装置通信状态监测



图 8 合环点相序状态检测

读取 141 志新线干线 54 号开关联测的遥测数据,进行合环开关处的相序测试,合环点两侧的 a 相电压矢量差为 0.162 kV,c 相电压矢量差为 0.182 kV,因此判定合环开关两侧相序一致,不需重新标定相序。

合环计算校验是分别计算环路阻抗、合环稳态电流、合环冲击电流,并将合环稳态电流与开关过流保护校验,冲击电流与开关速断保护校验,判断此次合环是否安全。计算时取 $\Delta U = 0.182\text{ kV}$,求得 $I_c = 54.9\text{ A}$, $I_c = 54.9\text{ A}$, $I_M = 99.4\text{ A}$,与原有负荷电流叠加,求得各监测点处的稳态电流和冲击电流大小,并分别与过流保护门限、速断保护整定值进行比较,判定此次合环操作不会引起开关误跳,因此不需要修改保护整定值,即合环校验成功,假如两项校验校验均通过,工作人员避免现场操作,远程即可实现开关分、合闸操作。合环计算校验、合环校验成功后,计算单端供电校验的系统截图见图 9 和图 10。

合环校验成功后,计算单端供电时的负荷电流、末端电压,并与开关过流保护、末端电压保护进行校验,判断此次解环是否安全。合环校验与单端供电校验通过后,工作人员不需要到现场进行分合闸操作,只需发送指令至前端装置,即可实现开关分、合闸操作。分合闸操作前需要进行操作人与监护人双

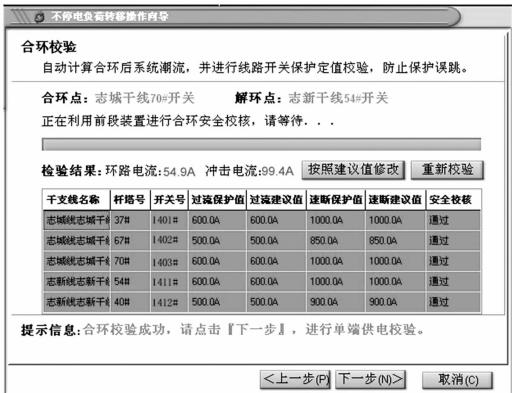


图 9 合环校验



图 10 解环校验

用户验证,以保证分合闸操作的安全性和可记录性。合解环操作后,拓扑图自动进行开关状态的变更,并显示最新采集的线路运行数据。不停电负荷转移操作向导及操作人确认界面见图 11。

4.3 数据分析

从系统数据库中读取合环前、合环后的各节点遥测数据以及由计算得出的系统环路电流数据 ($I_c = 54.9\text{ A}$),各节点环流稳态电流数据如表 1 所示。

由表 1 可见,该系统计算所得的各节点合环稳态电流数据与实测电流数据相差不大,最大误差为 13.5%,满足现场工程实际的要求。将合环前后各节点的遥测数据进行计算,求得各节点实测环流的平均值,再与系统计算环流大小进行比对,计算出误差较小在合理范围内,满足现场的应用要求,数据如表 2 所示。

从系统数据库中读取解环前后各节点的遥测数据、系统计算数据,进行比对发现如表 3 所示。

由表 3 可知该系统计算所得解环后各节点负荷数据与实测值相差不大,最大误差为 20%,在合理范围内,满足现场的应用要求。

本次试验,在合环、解环操作后对各节点的负荷

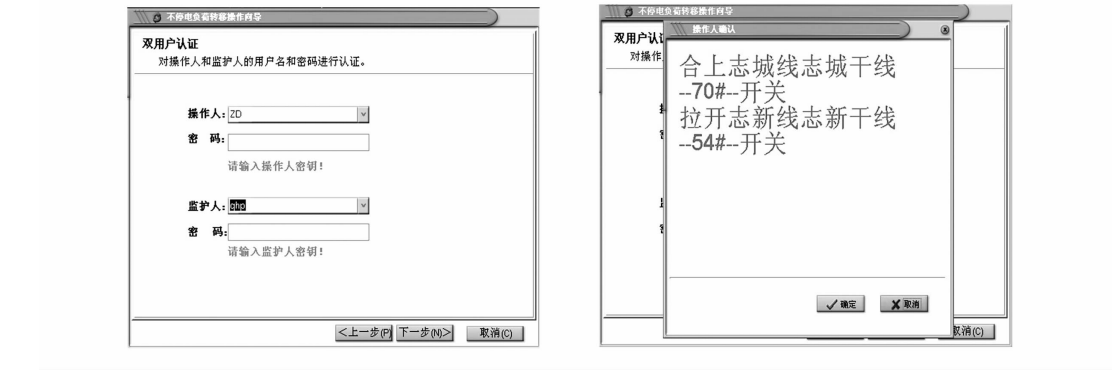


图 11 远程操作双用户认证及操作确认

表 1 各节点合环前后负荷数据

数据类型	参 数	志成线 37 号	志成线 67 号	志成线 70 号	志新线 54 号	志新线 40 号
合环前节点遥测值	I_a/A	34	10	0	21	68
	I_b/A	33	9	0	22	70
	I_c/A	34	10	0	19	67
	U_c/kV	5.98	5.99	5.91	5.86	5.91
计算所得节点合环稳态电流值	I_a/A	88.9	64.9	54.9	33.9	13.1
	I_b/A	87.9	63.9	54.9	32.9	15.1
	I_c/A	88.9	64.9	54.9	35.9	12.1
合环后各节点遥测值	I_a/A	92	65	54	34	15
	I_b/A	88	61	52	30	16
	I_c/A	89	63	55	35	14

表 2 各节点合环环流数据

测量点	I_A/A	I_B/A	I_C/A	I_{avg}/A
志城 37 号	58	55	55	56
志城 67 号	55	52	52	53
志城 70 号	54	52	55	53.7
志新 54 号	55	52	54	53.7
志新 40 号	49	49	52	50
计算环流				53.3

表 3 各节点解环负荷数据

数据类型	参 数	志成线 37 号	志成线 67 号	志成线 70 号	志新线 54 号	志新线 40 号
计算所得解环后各节点电流值	I_a/A	56	29	20	0	53
	I_b/A	58	31	22	0	51
	I_c/A	54	28	20	0	49
解环后各节点实测电流值	I_a/A	56	30	18	0	54
	I_b/A	57	31	21	0	54
	I_c/A	53	27	19	0	55

数据进行了召测,并与系统计算值进行比对,验证了此方法的准确性。利用计算所得的各节点合、解环稳态电流数据与过流保护整定值进行比较,合环冲击电流数据与速断保护整定值进行比较,判断是否可以安全合解环。实验结果表明,该系统提供的合解环决策结果正确,可以为工作人员提供较为准确的潮流数据,提供了合解环决策分析的数据基础,进而辅助调度人员进行合解环决策判断。但是在整个

计算过程中采用了一些简化,这些简化可能对计算结果带来了一定的误差:

1) 变压器的实际分接头位置不能获取,故系统忽略分接头的影响,直接折算到 10 kV 侧的额定变压器阻抗,对上级网络等值阻抗的计算会产生一定的影响;

2) 配电网中线路节点很多,不同杆号间采用的线路型号往往不同,但在计算中统一采用钢芯铝绞

线 LGJ-95 的电阻率($0.38\ \Omega/\text{m}$)进行计算,对环路阻抗的计算带来一定误差;

3) 配电线路中,尤其是 10 kV 配电网,线损很大,不同型号导线衔接点很多,对环路阻抗的计算带来一定误差;

4) 终端设备 FTU 有其自身的采样精度,所设计系统的合解环潮流计算是基于 FTU 采集的馈线实时数据,对计算结果可能造成一定影响;

5) 在计算中采用了一定的负荷等效方法,并认为在合解环过程中系统负荷未发生较大变化,对合解环潮流计算带来一定的影响。

5 结 语

首先对配电网合解环操作决策分析的理论基础进行了研究,并对系统的运行状况、配电网自动化实施状况进行了深入分析,在此基础上研究和实现了基于现有智能配电网信息平台的合解环决策分析系统,下面将工作进行一定的总结:

1) 对配电网合解环操作进行网络模型、合环潮流的计算、解环潮流的计算等研究分析,并选择出适合实际系统设计和实时的算法,为系统的设计和开发提供了理论基础。

2) 对现有馈线终端 FTU 进行研究,分析其馈线分段开关负荷电流采集原理,并在此基础上完善 FTU 的现有功能,实现对合环点压差数据的测量及合环点相序的判断。

3) 通过对 110 kV 变电站内的 10 kV 馈线联络开关进行合解环计算分析,由潮流计算结果及设备

保护验证分析得出,可以进行此次不停电负荷转移合解环操作。以实例分析说明了所设计系统具有合解环决策分析的功能,具有工程实用价值。

结合现场的实际运行情况,系统的改进应该从负荷等效、算法优化两个方面着手。总体来说,所开发的基于现有智能配电网信息平台的合解环决策分析系统可以完成系统合解环决策分析,可以辅助系统调度人员进行合解环决策判断,指导正确的合解环操作,系统的设计、开发具有一定的工程实用价值。

参考文献

[1] 李乃湖,倪以信,孙舒捷,等. 智能电网及其关键技术综述[J]. 南方电网技术,2010,4(3):1-7.

[2] 黄盛. 智能配电网通信业务需求分析及技术方案[J]. 电力系统通信,2010,31(6):10-12.

[3] 陆一鸣,刘东,柳劲松,等. 智能配电网信息集成需求及模型分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(8):1-4.

[4] 王伟灿,周昱甬. 电力系统合环电流的分析及控制对策[J]. 供用电,2002,19(4):26-28.

[5] 孙宏斌,张伯明,相年德. 配电潮流前推回推法的收敛性研究[J]. 中国电机工程学报,1999,19(7):26-29.

[6] 陈泉. 中小城市配网自动化系统的研究[D]. 济南:山东大学,2010.

[7] 刘健. 变结构耗散网络——配电自动化新算法[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.

[8] 李苏苏. 基于配网潮流的合环电流分析与控制[D]. 北京:华北电力大学,2005.

作者简介:

崔景顺(1989),硕士研究生、电气工程师,研究方向为输配电运检技术。
(收稿日期:2018-05-25)

(上接第 13 页)

[4] 赵晓东. 一起两点接地故障引起主变保护动作的分析[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报 2015,20(1):41-43.

[5] 张笑. 配电网短路故障计算方法研究[D]. 郑州:郑州大学,2010.

[6] 付锦,丁蓝,张淦水. 区外异名相接地故障引起主变差动保护动作的分析[J]. 电工技术,2017(8):70-72.

[7] 许彬. 基于 PSCAD 的 220 kV 线路开关雷击故障的电磁暂态分析[J]. 高压电器,2017,53(5):116-120.

[8] 张登花,杜浩良,郭宇隼,等. 10 kV 复合故障分析[J]. 电工技术,2015,8(11):10-11.

[9] 陈忠源,王延伟,孟杰,等. 电流互感器故障案例分析

及防范措施[J]. 变压器,2017,54(9):76-79.

[10] 王绪昭. 一种小接地电网两点接地短路的微机测距算法[J]. 河北电力技术,1987(6):55-59.

[11] 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,2006.

[12] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电设计手册[M]. 北京:中国电力出版社,2005.

作者简介:

朱凤娟(1987),硕士、工程师,主要从事电力系统调控运行管理、继电保护整定计算等工作。
(收稿日期:2018-06-27)

一体化配电网合环在线校核系统的建设与应用

王 玺¹, 刘 巍²

(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:结合主配一体化智能调度控制系统建设,基于省地县一体化模型中心,完成主电网与配电网模型、数据拼接,建立配电网合环操作在线校核系统。利用该系统进行配电网合环操作可行性分析和风险评估,在线校核系统提供合环稳态电流和冲击电流的计算、环路 $N-1$ 安全分析和遮断容量扫描等功能,减少合环操作的风险。

关键词:配电网合环;在线校核;一体化模型;安全分析

中图分类号:TM727 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)05-0022-03

Construction and Application of Online Integrated Loop – closing Verification System of Distribution Network

Wang Xi¹, Liu Wei²

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

Abstract: Combined with the construction of intelligent dispatching and control system for main and distribution network and based on the integrated model center, the main network and distribution network model and data splicing are completed, and online verification system for loop – closing operation of distribution network is established. The proposed system is applied for the feasibility analysis and risk assessment of loop – closing operation. The online verification system provides the calculation of loop steady – state current and inrush current, $N-1$ safety analysis and breaking capacity scanning, which reduces the risk of loop – closing operation.

Key words: loop – closing operation of distribution network; online verification; integrated model; safety analysis

0 前 言

近年来,随着电网规模不断扩大,电网安全稳定问题日益突出。配电网作为电力传输的终端网络,线路错综复杂,方式调整频繁。配电网架构的不断完善使具备合环条件的线路日益增多,为配电网调控运行带来了压力和挑战。优质服务及用户对停电事件容忍程度降低的压力,导致地县调层面对配电网合环负荷倒供的操作手段需求日趋迫切。10 kV 配电网尤其是跨 220 kV 变电站形成电磁环网引起潮流重新分布,冲击电流大、合环失败造成严重后果等不利因素,需经过校核后进行合环操作。

目前,地区电网调控运行人员的合环操作依据

主要分为人工经验和离线分析计算两种。

依据人工经验进行合环操作的方式,按照调度规定,核对相位相序相同,电压幅值相差 20%、相角相差 30°以内,可进行合环操作。人工经验合环操作要求调度运行人员熟知电网运行方式,熟悉线路运行情况,并且有丰富的调度生产经验,才能保证所选合环方式安全可靠。因此,人工经验在新投运线路有合环要求、调度运行人员业务技能不够高时,可能造成误判断,该类方式不具备普遍性,无法移植^[1]。

离线分析计算方式不能满足实时性要求,合环电流计算结果精确性不高,未考虑在合环运行后电网的潮流分布、 $N-1$ 安全状态、母线短路电流,缺乏有效的针对电网解合环操作的风险分析。同时未考

虑主、配电网协同计算,现有的合环操作风险分析软件在涉及到主、配电网模型的合环时,往往采用主、配电网各自等值的方法,同样存在较大的计算误差,因此有必要通过主、配电网协同分析提高合环电流计算结果的准确性^[2]。

1 系统的建设

在线校核系统的建设依托省地县一体化模型中心,构建覆盖 35 kV 及以上厂站的全数据、全模型。依托地调主配一体化智能电网调度控制系统(D5000),构建覆盖本地区的主电网及 10 kV 配电网全数据、全模型。

基于两个一体化,主电网实时网络模型以及设备状态来自本地状态估计及省地县一体化模型中心(全省 QS 文件)计算结果,配电网模型数据来自本地主配电网一体化系统,并在地调层面通过主配一体化系统完成主配电网模型、数据拼接,作为在线校核计算的基础断面,通过全网自动拓扑搜索确定合环操作的环路路径,利用实时状态的全网导纳矩阵求解合环操作的合环端口阻抗,结合全网基态潮流信息以进一步求得合环电流的时域特性,并与合环线路保护的整定值进行比较,完成合环操作的风险分析。一体化配电网合环操作在线校核系统建设流程如图 1 所示。

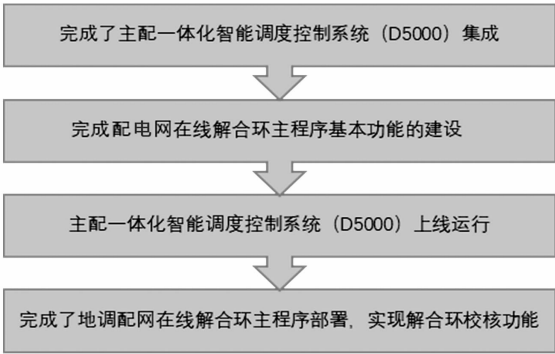


图 1 一体化配电网合环在线校核系统建设流程

2 系统功能及校核流程

2.1 系统功能

为开展不停电转供负荷,进行合环操作可行性分析和风险评估,在线校核系统提供了包括合环路径拓扑搜索和校验、合环稳态电流和冲击电流的计算、环路 $N-1$ 安全分析和遮断容量扫描等功能,减

少合环操作的风险。系统界面如图 2、图 3 所示。

2.2 校核流程

在线安全校核流程分为 7 个步骤:模型断面选择、合环前潮流计算、设置合环点、获取线路参数和保护定值、合环路径校验、合环计算、合环结果和建议,如图 4 所示。

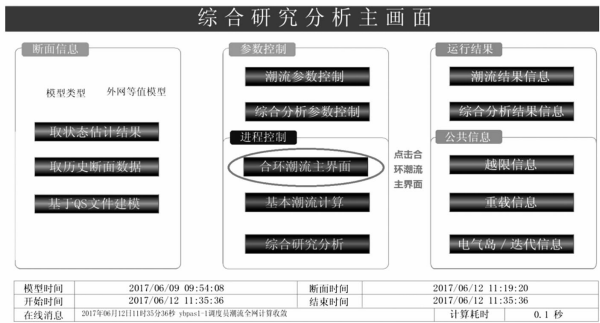


图 2 综合研究分析主界面

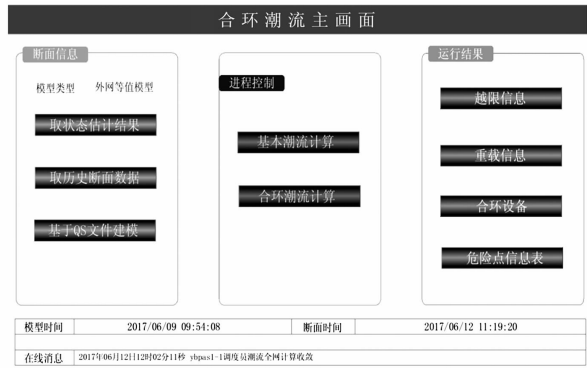


图 3 合环潮流主界面



图 4 在线校核系统流程

3 系统应用

系统应用以合环稳态电流和冲击电流计算为例。

3.1 不同 220 kV 变电站 10 kV 线路解合环试验

以某地区不同 220 kV 变电站供电的 10 kV 线

表 1 不同 220 kV 变电站供电的 10 kV 线路合环计算值与实测值对比

项目	SCADA 合环前 电流值 /A	主站计算合环前 电流值 /A	SCADA 合环后 电流值 /A	计算合环后 电流值 /A	录波器冲击 电流 /A	计算冲击 电流 /A
阳桥线 993 断路器	0	0	33.60	34.15		
尖牛线 991 断路器	115.31	115.97	144.38	133.58	47.52	49.64

路为例,合环前运行方式如图 5 所示。

合环前阳光变电站 10 kV 阳桥线 993 断路器有功 0 MW、电流 0 A;尖子山变电站 10 kV 尖牛线 991 断路器有功 2.06 MW、电流 115.31 A。

合环后在线校核系统计算结果如图 6 所示,阳光变电站 10 kV 阳桥线 993 断路器处合环故障录波装置实测采集值如图 7 所示。

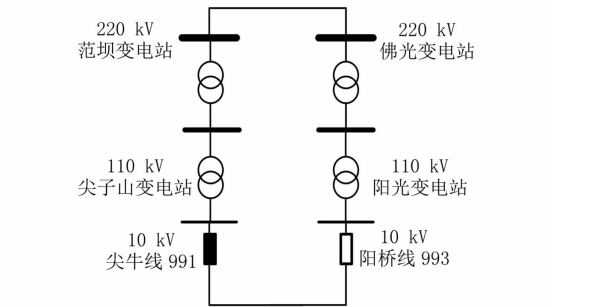


图 5 不同 220 kV 变电站 10 kV 线路合环前运行方式

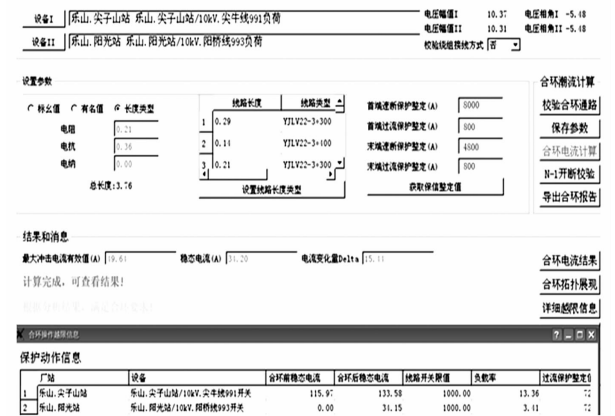


图 6 合环计算结果

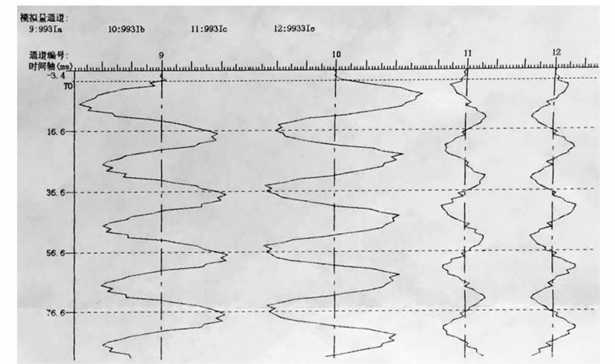


图 7 故障录波装置实测

计算值与实测值对比见表 1。配电网合环操作

在线校验中,阳光变电站 10 kV 阳桥线合环后稳态电流计算值为 34.15 A,SCADA 实测电流值为 33.6 A,与真实值偏差 0.55 A,偏差率为 1.64%;尖子山变电站 10 kV 尖牛线合环后稳态电流计算值为 133.58 A,SCADA 实测电流值为 144.38 A,与真实值偏差 -10.8 A,偏差率为 -7.48%;合环时计算的最大冲击电流有效值 49.64 A,采集到的最大冲击电流有效值为 47.52 A,与真实值偏差 2.12 A,偏差率为 4.46%。主配电网在线校核应用计算的数据与实际操作采集的数据值基本吻合。

3.2 同一 220 kV 变电站 10 kV 线路解合环试验

以某地区同一 220 kV 变电站供电的 10 kV 线路为例,合环前运行方式如图 8 所示。

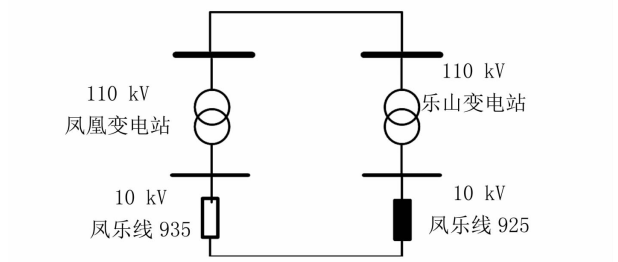


图 8 同一 220 kV 变电站供电的 10 kV 线路合环前运行方式

合环前凤凰变电站 10 kV 风乐线 935 断路器有功 0 MW、电流 0 A;乐山变电站 10 kV 风乐线 925 断路器有功 1.49 MW、电流 83.36 A。

合环后在线校核系统计算结果如图 9 所示,凤凰变电站 10 kV 风乐线 935 断路器处合环故障录波装置实测采集值如图 10 所示。

计算值与实测值对比见表 2。配电网合环操作在线校验中,凤凰变电站 10 kV 风乐线合环后稳态电流计算值为 324.87 A,SCADA 实测电流值为 316.8 A,与真实值偏差 8.07 A,偏差率为 2.55%;乐山变电站 10 kV 风乐线合环后稳态电流计算值为 281.25 A,SCADA 实测电流值为 265.92 A,与真实值偏差 15.33A,偏差率为 5.76%;合环时计算的最大冲击电流有效值 461.84 A,采集到的最大冲击电流有效值为 455.22A,与真实值偏差 6.62A,偏差

(下转第 48 页)

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
(国网四川省电力公司德阳供电公司,四川 德阳 618000)

摘要:随着城市化进程的稳步推进,大量市区架空线路“提档升级”逐步采用电缆线路。特别是近十年以来,大量的电缆被安装到了配电网系统中。如何有效检测出在运配电电缆的隐患也成为了迫在眉睫的问题。提出了一种综合利用现有在线测温、暂态对地电压局部放电检测、阻尼振荡波检测等配网电缆检测方法,能有效地检测、诊断及定位电缆附件绝缘隐患的方法。

关键词:缺陷诊断;阻尼振荡波;TEV局放检测;在线测温

中图分类号:TM591 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)05-0025-04

Comprehensive Detection Method for Improving Defect Detection Efficiency of Cable Accessories in Distribution Network

Han Qihe, Xie Lei, Zhang Zengzhi, Zhang Yu, Tang Chao, Zeng Na, Li Zhuowen
(State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization, a large number of urban overhead lines have been gradually replaced by cables as a result of the "Road Improvement" project. Especially in the last decade, a large number of cables have been installed in power distribution network. The urgency of detecting insulation defects in running cables is also increasing. A comprehensive utilization of the existing online temperature measurement, transient earth voltages (TEV) and damped oscillatory wave test system (OWTS) is proposed, which can effectively detect, diagnose and locate the insulation defects of cable accessories.

Key words: defect diagnosis; damped oscillatory wave; partial discharge detection of transient earth voltages (TEV); online temperature measurement

0 引 言

交联聚乙烯绝缘(XLPE)电力电缆线路因敷设便利、运行可靠性高、不易受天气等外部环境影响,不占用地面空间、绝缘性能优良等特点,并契合了现代化城市的美观及规划、设计需求,使其在输配电网,尤其是城市配电网中得到了广泛的应用。然而,交联聚乙烯绝缘电缆本身的构造紧密,且绝缘介质为性质稳定的材料,让运行人员很难准确地评估电缆及电缆附件的绝缘健康状态。现有检测手段的准确性、便捷性和有效性对于电缆内部绝缘缺陷隐患的检测及定位来说还稍显不足。

根据统计资料显示,电缆附件(主要包括电缆中间接头与电缆终端头)的故障率是电缆本体故障率的百倍以上^[1]。所以可通过重点关注电缆附件绝缘的老化、劣化情况,来判断电缆线路的运行状态。而电缆附件的绝缘缺陷早期主要体现在局部放电方面。局部放电一般不会直接引起绝缘击穿,但如果长时间存在则会使绝缘强度逐渐降低^[2-3]。因此,通过对电缆附件的局部放电监测,能帮助判断电缆线路及电缆设备运行的健康状态,但对配电电缆实时在线局放检测的成本较高。下面通过对现阶段配电网电缆常用的在线测温装置、暂态对地电压(transient earth voltage, TEV)局部放电检测及振荡波检测的综合运用,来提高电缆附件局部放电检测效率。

1 配电网电缆常用检测方法

1.1 在线测温装置

研究表明绝大多数的绝缘缺陷都可引起电缆附件本体或局部温度升高,当温度升高到超过电缆附件所能承受的临界值时,电缆接头就有可能发生热击穿甚至爆炸,造成大范围的断电或引起火灾^[4]。

通过对电缆附件的温度进行实时在线监测,可以及时有效地发现电缆附件的温度异常并形成告警信息,进而避免电缆附件及电缆设备起火、线路停电等事故的发生。国网四川省电力公司德阳公司目前的在线测温装置主要是热敏电阻式测温系统,通过对电缆终端温度的实时监测,已发现了数起电缆终端过热情况,及时发现并消除了隐患,避免了电缆故障的发生。

然而在现场应用过程中也发现了在线测温装置存在部分弊端。首先,在线测温装置需要外部电源,限制了其应用范围只能是在环网箱和开闭所等方便取电的设备内,对于电缆分支箱和电缆井内的中间接头则无法实现在线测温。第二,当前使用的在线测温主要通过热敏电阻作为传感器贴在电缆附件上实现温度采集功能,但因为热敏电阻传感器需要构成电气回路方可采集信号,布线复杂;且热敏电阻特别容易发生损坏,更换新电阻的维护量大;传感器本身不具备自检功能,使运行部门难以判断传感器的工作状态,需要经常进行现场校验。第三,后台报警功能工作模式为接头温度超过一定温度后报警,但实际运行过程中当电缆的运行负荷或环境温度发生变化时,都会造成电缆附件周围温度发生变化,容易形成误判。第四,当温度报警发生时,通常局部放电已经处于发生的后期阶段,留给运行单位的处理时间不充足。

1.2 暂态地电波局部放电检测

根据电磁学的理论,当开关柜、分支箱等电缆设备内部发生局部放电时,局部放电点会激发出电磁波向周围空间传播,当遇到未封闭的金属板的外表面时,会在金属外壳上感应出电位,该电位称为暂态地电压(即地电波)。在实际生产运行中,配电网电缆设备如开关柜、分支箱中存在许多绝缘间隙,如绝缘垫片、电缆进出口等,柜体本身是不连续的。因此可在开关柜体外表面上检测到该电磁波所感应出的

有效电波信号,即地电波信号^[1]。暂态地电波局部放电检测是对开关柜、分支箱的金属外壳地电位进行检测,通过对测量到的地电波信号判断局部放电的位置、类型和放电量之间的关系^[5-6]。暂态地电波局部放电检测具有测量判别方便、能带电进行、测量时间短、定位较准确等诸多优点。

但在现场检测过程中,空间的电磁波可进入开关柜室,且周围的电力设备也会产生电磁波,这些电磁波信号会对检测造成干扰,造成设备误判断。

1.3 阻尼振荡波局部放电检测

目前配电网电缆常用的电缆绝缘性能检测手段主要以交流耐压、直流耐压试验等破坏性试验为主,虽然能够有效发现电缆附件及电缆本体的较为严重的绝缘缺陷,但这两种预防性试验均会不同程度地造成电缆绝缘劣化,大大降低电缆使用寿命。而且其试验系统构成复杂、试验设备体积重量大,不利于在复杂地形环境下开展检测。

阻尼振荡波局部放电检测系统通过设备与被试电缆之间构造 LC 振荡回路,在系统中形成近似于工频的逐步衰减的振荡波电压信号来模仿电缆的运行状态,进而在电缆绝缘薄弱处激发出局部放电信号;再同步收集波形信号,通过后台分析软件可分析采集波形信号,从而判断电缆绝缘的好坏。阻尼振荡波局部放电检测对电缆施加的是衰减振荡波信号,加压时间仅为几秒,基本不会对电缆绝缘造成损伤^[7]。

但实际应用过程中,因该试验需要停电进行,在供电服务压力逐渐增大的情况下很难逐条线路进行试验。目前只能在新建电缆线路以及结合日常检修停电时在重要电缆上进行检测。检测对象覆盖面较小,且面对庞大的存量电缆要实现配电网电缆大体检耗时也过长,难以对配电网电缆附件绝缘状态评估提供有力支撑。

2 综合检测方法

分析现有的配电网电缆检测方法可以发现,目前的检测方法均存在不同程度的弊端。

在线测温装置通过传感器采集终端的温度信息判断终端的运行状态;暂态对地电压局部放电检测通过采集环网柜、分支箱等设备金属表面的感应电位来判断电缆附件是否有局部放电;而阻尼振荡波

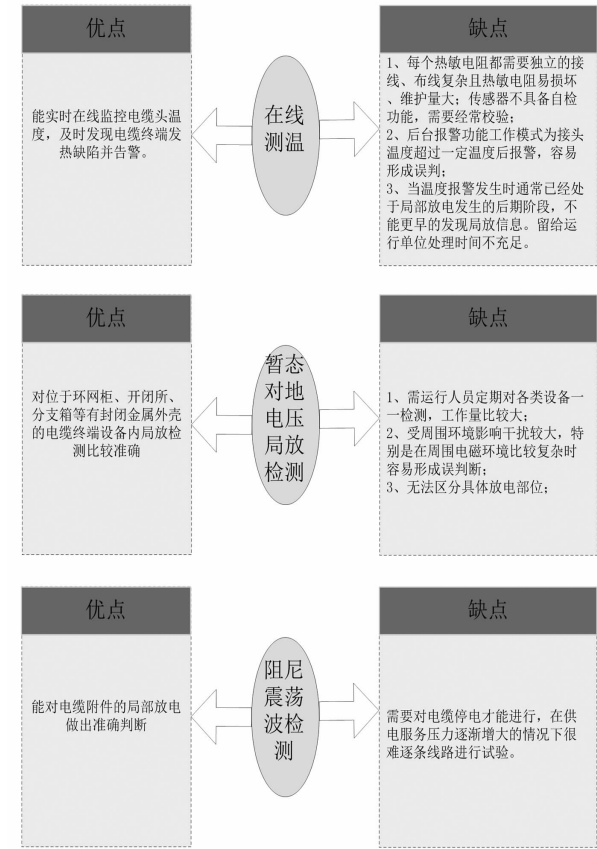


图 1 各种检测方法的优缺点对比

检测通过对电缆施加衰减振荡波并采集系统振荡波形信号来判断电缆绝缘状态。不同的检测方法采用不同的原理来进行状态检测,但都存在信号采集方法单一,可能存在设备、环境、人为因素干扰造成误判的问题,不能给运行单位提供精准的检修建议。通过对各种检测方法进行充分分析(见图 1),针对不同检测方法的优缺点提出了综合检测,具体操作流程如图 2 所示。

首先,通过在线温度检测的实时监测功能,监测电缆终端的运行温度,通过对比相间及环境温度、负荷电流等对监测数据进行分析。其次,对发现有温度异常的电缆终端进行暂态对地电压局部放电检测,检测该附件是否有局部放电现象。如未发现该终端有局部放电现象,则继续对该终端进行温度监测,同时结合停电机会检测找出引起温度异常的原因;如两种检测方法均发现该终端有异常,即有两个非相同原理的检测同时判断电缆终端有局部放电,则认为该终端处确实存在局部放电现象,需安排停电检修。在停电检修时同步安排阻尼振荡波试验,检测该电缆其他附件是否存在相似的隐患。

2018 年 4 月 2 日,配电运检人员通过在线测温

监测平台发现 10 kV 某路某环网柜 9043 间隔至某小区出线电缆 A 相温度明显高于其他间隔电缆终端及同间隔另两相电缆终端温度,但因未达到警戒温度而无报警信息,如图 3 所示。

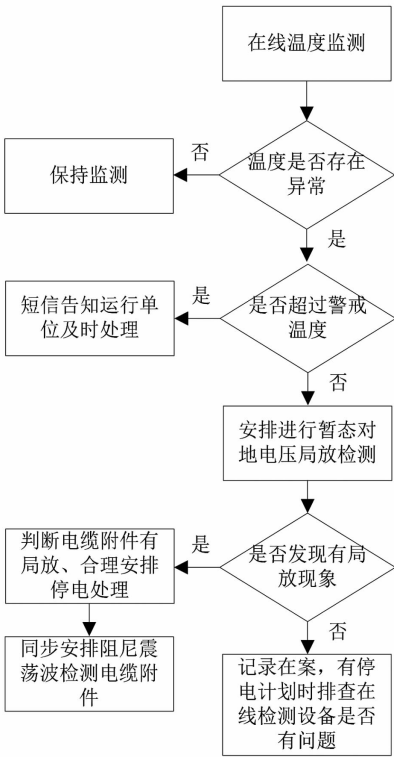


图 2 综合检测流程

数据监测									
统计分析 档案管理 通信日志 系统管理									
2018-04-02									
9041柜A相上 9041柜B相上 9041柜C相上 9042柜A相上 9042柜B相上 9042柜C相上 9043柜A相上 9043柜B相上 9043柜C相上									
触点温度	工.	触点温度	工.	触点温度	工.	触点温度	工.	触点温度	工.
25.15	3..	25.43	3..	25.01	3..	26.01	3..	25.70	3..
24.20	3..	24.51	3..	24.10	3..	25.01	3..	24.71	3..
23.39	3..	23.66	3..	23.26	3..	24.06	3..	23.76	3..
22.59	3..	22.88	3..	22.45	3..	23.22	3..	22.95	3..
21.85	3..	22.15	3..	21.71	3..	22.49	3..	22.15	3..
21.21	3..	21.48	3..	21.01	3..	21.78	3..	21.45	3..
20.51	3..	20.85	3..	20.38	3..	21.08	3..	20.81	3..
20.00	3..	20.35	3..	19.88	3..	20.55	3..	20.32	3..
19.82	3..	20.22	3..	19.69	3..	20.38	3..	20.15	3..
20.38	3..	20.68	3..	20.15	3..	20.75	3..	20.55	3..
21.68	3..	21.71	3..	21.31	3..	21.81	3..	21.52	3..
23.39	3..	23.33	3..	23.02	3..	23.49	3..	22.98	3..
								23.05	3..
								59.10	3..
								59.62	3.27
								59.56	3.27
								24.13	3.35
								23.24	3.35
								23.24	3.35
								23.24	3.35
								58.76	3.28
								58.81	3.28
								58.76	3.28
								58.87	3.28
								59.10	3.28
								22.25	

图 3 在线测温数据

配电运检人员在连续监测该处异常 24 h 后发现该处温度异常并未消失,立刻安排运行人员对该间隔进行了暂态对地电压局部放电检测,检测结果显示该间隔存在局部放电。由于两种检测方法都判断此终端存在局部放电现象,于 4 月 9 日安排停电处理,同时针对该电缆进行阻尼振荡波检测。通过阻尼振荡波检测发现该电缆除终端有局部放电外,在中间接头处也有局部放电现象,检测结果如图 4。

通过对该电缆终端及中间接头解剖发现,因未严格按生产厂家图纸尺寸剥切铜屏蔽及半导体层,

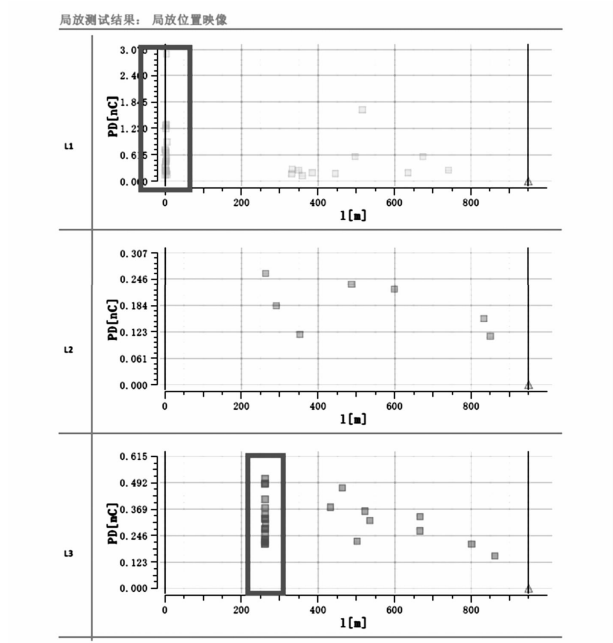


图 4 阻尼振荡波局部放电位置映像

致使应力锥安装错位并未起到应力疏散作用而在屏蔽层断口处出现放电,这是导致此次问题的主要原因。

多种检测方法的配合使用,能极大提高检测的精度。当两种或两种以上的检测手段同时判断电缆附件有问题时即可认为该附件确存在局部放电现象。对比以往单个检测手段判据不足的问题,综合检测能为运行单位提供精准检修建议。

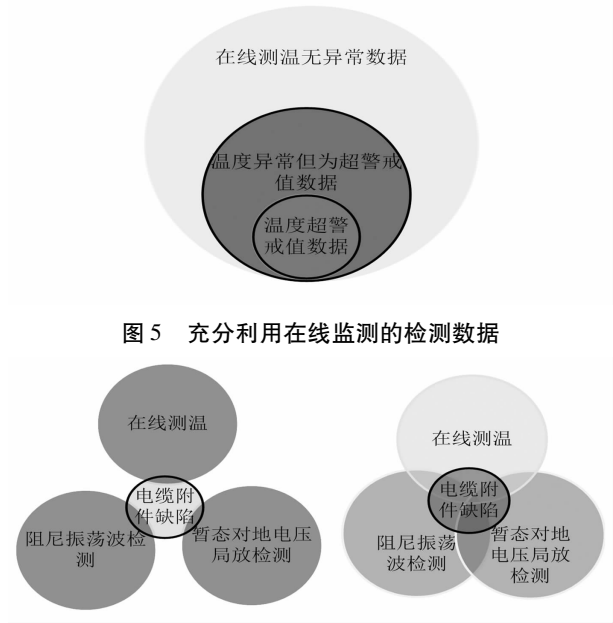


图 5 充分利用在线监测的检测数据

综合检测方法旨在解决现有检测方法两方面的问题:

1)单一检测方法相对独立,没有最大化地发挥作用。综合检测通过 3 个方面对现有方法进行提升。首先,对以往未被利用的未达到报警界限的终端温度异常数据进行应用,提升了检测的效率;其次,在线测温系统的实时监测,可以减少对温度正常附件的地电波检测频率,极大地减少运行人员工作强度;最后,同一电缆线路一般由同一施工队敷设且由同一厂家提供电缆附件,在一个终端出现绝缘缺陷的电缆线路上的其他附件极有可能也存在同样的缺陷,通过振荡波局部放电的诊断能及时有效地发现排除隐患,在没有大量增加停电的同时提高了振荡波局放检测的工作效率,对提升配网电缆附件隐患检测效率具有重要意义。

2)现有检测手段因设备本身的缺陷及人为因素的干扰等很容易形成误判断,这给精准检修带来了极大的难度。综合检测因采用的是温度、电磁波以及阻尼振荡波等非同原理的判定方法,极大地提高了判定的精确性,减少甚至避免了因误判断而停电检修等一系列问题。

3 结 语

随着配电网电缆规模的不断扩大,对配电网电缆的状态检测及精准检修需求也日益增大。但目前针对配电网电缆的检测方法在应用过程中相对独立,不能充分发挥各个检测方法的优势。而由于设备及人为因素的干扰形成的误判时有发生,不能给运行单位提供准确的检修建议。所提方法通过对现有的 3 种配电网电缆检测方法的有机结合,在最大限度地发挥各种优势的同时,减轻了运行人员工作量,同时能给予运行部门相对精确的检修建议,给停电检修留下充分的时间。

参考文献

[1] 李伟,丛光,任志刚,等. 电缆终端缺陷的综合检测诊断技术分析[C]. 全国第九次电力电缆运行经验交流会论文集,上海,2013:238-241.

[2] 陈昕. 10 kV 开关柜局部放电暂态接地电压测量方法研究[D]. 南京:东南大学,2016.

[3] 张仁豫,陈昌渔,王昌长. 高电压试验技术(第三版)[M]. 北京:清华大学出版社,2009.

(下转第 42 页)

有序放开发用电计划及电网企业应对策略研究

魏 阳¹, 罗晓伊², 佟如意², 严 磊¹, 梁 健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:有序放开发用电计划是发电侧和售电侧改革的重要内容,对推进电力市场化改革具有重要意义。在回顾电力体制改革相关理论研究的基础上,对比分析国际电力市场改革经验,并对中国电力市场的现状进行了考察。最后,结合电网企业实际,从盈利空间、电网规划、电网运营和电网调度等4个方面解读有序放开发用电计划对电网企业的影响并据此提出应对建议。

关键词:电力市场;发用电计划;售电侧改革;电网企业

中图分类号:F062.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)05-0029-05

Orderly Release of Electricity Plan and Response Strategy for Power Grid Enterprises

Wei Yang¹, Luo Xiaoyi², Tong Ruyi², Yan Lei¹, Liang Jian¹

(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 orderly release of electricity plan is the key section of electricity industry reform, and it is of great importance to electricity market reform. Based on the review of the theory researches on electricity industry reform, the current situation of electricity market reform in China is investigated by comparing with the developed countries. Then, combined with the reality of power grid enterprises, some suggestions are put forward from four aspects, that is, management strategy, power grid planning, power grid operation and power grid dispatching strategy.

Key words: electricity market; electricity plan; market reform of electricity selling side; power grid enterprise

0 引 言

2015年3月,党中央、国务院发布了《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》(中发〔2015〕9号),标志着新一轮电力体制改革拉开帷幕。同年11月,国家发改委、国家能源局发布《有序放开发用电计划的实施意见》,就优先发购电制度、电力电量平衡工作、电力直接交易等方面进行明确。政府主导发用电计划制定是计划经济时代的产物,在保障电网安全稳定运行方面发挥了重要作用,但这种管制制约了市场发挥资源配置的作用,无法实现价格发现功能,也不利于跨区跨省送电和节能减排的推进。发用电计划的放开将推动发电侧和售电侧市场竞争机制的建立,实现市场发挥资源配置

的作用和价格发现功能,并助力打破省间壁垒,促进清洁能源的消纳。

目前,中国的发电侧已经形成“厂网分开”的局面,而售电侧市场才刚刚起步,电力市场尚未形成“多买多卖”的竞争格局。作为电力体制改革“三放开”的关键一个环节,有序放开发用电计划将为市场竞争创造条件,有效推动电力市场改革进程。在此背景下,电网企业要进一步提高认识,一方面,要主动服务,为发用电市场创造良好市场环境;另一方面,要认识到新形势下,市场环境和政策对企业经营带来的挑战,积极调整经营策略,提高市场竞争力。基于此,在总结电力市场改革理论及国际经验的基础上,剖析放开发用电计划放开对电网企业的挑战与影响,并从经营管理、电网规划、电网运营和电网调度等方面给出应对策略。

1 国内外研究综述

在电力产业链中,发电、输电、配电和售电是最主要的 4 个环节。不同的国家在上述各个环节上的市场开放程度存在差异,也就形成了不同类型的电力市场结构和模式。据此,Hunt 归纳出了 4 种典型的电力市场结构模式,它们分别是:纵向一体化的垄断模式、单一买方的发电竞争模式、批发竞争模式和零售竞争模式。在此基础上,进一步明确了电力行业引入竞争所需要的条件^[1]。随着电力市场化改革的深入,电价形成机制问题因与电力成本和电力市场竞争密切相关,引起了学者们的广泛关注。首先,在考虑电力成本影响的电价形成机制方面,学者们基于 20 世纪 70 年代油价上涨引发电价强烈波动这一现象,通过对两者内在逻辑的分析与揭示,提出了相应的电力定价方法,较为典型的有低成本定价法、均匀成本定价法、边际成本定价法等等^[2-5]。其次,在考虑电力市场竞争的电价形成机制方面,以 Vickrey^[6]、Hobbs、Metzler 与 Pang^[7]、Gan 与 Bourcier^[8]等为代表的学者有效地利用博弈论模型,对市场竞争结构下的电力定价机制进行了刻画和分析,揭示了良好的电力市场竞争对降低电价以及增大社会福利的积极影响。

相比国外,国内开始市场化电力改革的时间相对滞后。鉴于中国在 20 世纪 80 年代之前一直处于计划经济阶段,为了便于统筹调度,中国在售电市场也相应地采用了单一电价模式。进入 20 世纪 80 年代,随着电力市场化改革的逐渐推进与深化,逐渐调整为多种电价并存模式,由此掀开了国内学术界关于电力市场化改革研究的序幕。综合而言,国内电力市场化改革的研究主要集中在售电市场的市场细分、交易模式、报价原理以及竞价机制等方面,基本观点如下^[9-13]:1)从改革进程来看,中国电力市场化改革仍然处于过渡阶段,一些遗留问题需要尽快解决;2)从改革侧重来看,中国电力市场化改革的重心主要是放在合同市场,现货市场的改革才刚刚起步;3)从改革举措来看,加大竞价电量已经成为推动电力市场化改革的重要手段。相应的,批发竞争模式也成为了与当前电力市场化改革环境最匹配的市场结构模式。

纵观已有的国内外理论研究可以看到,鉴于电

力工业对国民经济发展的重要影响,电力市场改革已成为各国工业化过程中必须经历的过程。由于各个国家国情的差异,各国电力市场化改革的进度、内容、举措等也不尽相同^[14-17],但这些理论研究成果为中国由计划向市场改革提供了诸多有益的理论指导和实践参考。

2 国际经验

在国外,不同的国家和地区电力市场化改革的目标和路径不尽相同,其推进速度和在不同阶段所选择的电力市场结构模式也存在差异。以德国为例,德国最初采用的是纵向一体化的垄断模式,为了推动国内电力市场化改革进程,提升电力市场运行效率,德国政府随后将电力公司拆分为发电公司、输电公司、配电公司和售电公司 4 个不同的市场运营主体,并制定和出台了如下的一系列措施:1)立法引导,在放开发电计划方面优先保障清洁能源地位;2)用高额补贴和全额上网的保障机制吸引资金,引入多元化市场主体;3)将计划电量市场化;4)建立独立且匿名保密的交易平台(欧洲能源交易市场,EEX),还原电力商品属性,推动发电计划有序放开;5)完善交易机制,将电价结构细分为 12 项不同的税费;6)设立联邦网络管理局(FNA)来监督市场参与者和政府。经过持续多年的努力,德国的电力市场结构模式最终转变为零售竞争模式。

相比于德国,日本的电力市场化改革则相对稳健。早在 20 世纪末,为了打破纵向一体化的垄断模式,放开发电环节的竞争,日本政府于 1999 年开始先后三次对《电力事业法》进行修改。进入新千年后,2011 年日本国内的“3.11”地震事件证明了全面放开发电计划的市场化改革方式在应对特大紧急意外时存在严重缺陷,这也从侧面验证了进行稳健型的电力市场化改革的必要性。现阶段,通过多年的酝酿和稳中有序的推进,日本政府拟开始新一轮电力市场化改革,这将是日本自 1950 年以来对电力行业最大范围的重组,改革的中期目标是实现发电和输电的分离,长期目标则是电力自由化和市场化。

整体而言,大部分国家和地区遵循“从垄断和管制向市场化和自由化转变”的电力市场改革路径,致力构建“多买多卖”的电力交易格局。但也有一部分决策者认为电力市场化和自由化会加剧电价的波动

性,最终不利于电力市场运行效率。为维护电价的稳定性,一些国家和地区则选择了“从市场化和自由化回归垄断和管制”的改革路径。加拿大的安大略省就是其中一个典型的例子。在改革之前,加拿大安大略省的水电公司一直采用纵向一体化的市场结构模式,实行垄断经营和管制定价。当开始改革后,安大略省将发电和售电环节从原来的水电公司独立了出来,并采用了发电环节竞争上网,输配电环节进行价格管制,售电环节自主化定价的方式,力图提升电力市场的运行效率,但结果却事与愿违。上述改革一经推行,安大略省的发电价格和售电价格均出现了大幅上扬的局面,给整个区域的电力工业带来了巨大的负面影响。最终,迫于维护区域电力市场稳定性的压力,安大略政府放弃了售电环节市场化运营的决定,重新对销售电价进行价格管制。

综合德国、日本、加拿大安大略省的实例可以发现,由于各个国家和地区自身情况的差异,其最终所选择的电力市场化改革的程度会有差异,甚至个别国家和地区还出现了改革倒退的情况。但不管最终各个国家和地区的电力市场结构模式如何选择,其关键是要结合本国国情,在电力市场供应的稳定性、经济性和电力市场运行的效率性之间进行有效的平衡,实现计划向市场的平稳过渡。

3 有序放开发用电计划

3.1 有序放开发用电计划的内容

经过近 20 年的持续努力,中国已经打破了纵向一体化的垄断市场结构模式,并在发电侧上取得了较好的市场化改革成果。但整体而言,在基本实现“厂网分开”后,“十五”、“十一五”期间电力体制改革进展比较缓慢。2017 年 3 月《关于有序放开发用电计划工作的通知》正式印发,标志着电改进程的提速,发用电计划放开进入实际操作阶段,发电方和用电方将真正实现直接撮合交易。

发用电计划的分阶段、有序放开意味着一个电力交易批发市场将真正开始形成,这也是中国电力市场改革的设想与目标。在这一市场结构模式下,市场交易电量扩大,交易主体范围将增加,用户选择权进一步拓宽。按照有序放开发用电计划的相关部署,优先购电计划执行政府定价,由电网公司予以保障;无议价能力用户以外的电力用户等购电主体参

与市场交易;售电公司既可以扮演大用户的角色,与发电企业进行电力直接交易,又可以作为中小用户的代理者,参与电力直接交易。

为了有效推动批发竞价市场结构模式的形成,以往的市场交易主体需要对自身的功能定位进行调整。比如,对政府而言,需要逐渐从计划制定者向计划保障者的角色转变,未来的工作重点应当是对交易平台的监管和市场准入白名单的审核,引导企业加入市场交易,完善监督和保障机制,以发挥价格对资源配置最基础的作用。对电网企业而言,过去在电力市场运营中的核心地位必然会被削弱,必须要进行主动的战略调整,注重发挥交易中心的作用,通过采取积极措施来应对正发生深刻变化的各项政策和市场环境。

3.2 电网企业面临的挑战

发用电计划放开后,电网企业的盈利空间、电网规划、电网运营和电网调度均将面临巨大挑战,转型已经成为电网企业必然的选择。

3.2.1 盈利空间的挑战

发用电计划放开后,电网企业经营环境将会出现重大变化:1)短期范围内,电网企业垄断电力销售的局面将会被打破。2)长期范围内,电网企业需要完成从电力市场运营的核心企业向电力传输服务企业的功能定位转变。基于上述变化,电网企业需将未来的经营重心从电力“传输+销售”的复合经营方式逐渐向以提供公共传输服务为主的经营方式转变。这意味着,从短期来看,包括发电企业在内新的售电主体将成为电网企业在售电领域的强有力竞争者;从长期来看,一旦完成转型,电网企业的盈利点将变成单一的收取电力传输的“过网费”。显然,不管是短期还是长期,在新的电力市场改革形势下,电网企业的盈利空间势必受到挤压。

3.2.2 电网规划的挑战

目前,电网规划与新型电力市场结构不匹配,放开发用电计划对电网规划提出了新的要求。

1)规划灵活性。随着发用电计划的逐步放开,具有选择权的市场主体逐步增加,独立的售电主体、分布式能源等纷纷加入市场,增加了整体配电网架结构的不确定和不稳定性,对电网规划提出了更高的要求,增加了电网统筹规划和机网协调的难度。

2)监管更严格。放开发用电计划的目的是在发、售两侧形成充分竞争,因此也必将增加政府对电

网的监管,监管机构提出“要稳妥推进电网规划和投资行为监管”,这使得电网规划和建设工作的批准和审核变得更加严格,同时也对电网规划的合理性和有效性提出了更高的标准,投资效率将作为衡量电网投资的核心要素进行考量。

3.2.3 电网运营的挑战

发用电计划的逐步放开,更多市场主体和大规模间歇式能源进入,将对电网的运营产生显著影响。

1)在计划向市场过渡的过程中,随着市场交易电量的增长、清洁能源的大量接入、市场行为不确定性等问题的出现,电力市场的各种突发情况和安全事故的概率会大大增加,这无形中增加了电网企业运营的难度。

2)在电力批发市场建设进程中,监管机构进一步加强市场公平性和规范性的监管,要求电网对市场主体无歧视、公平的放开,对电网运营水平和服务质量提出更高要求。

3.2.4 电网调度的挑战

随着电力市场发用电计划放开,发电侧和售电侧市场逐步建立,将改变电网现有的运行和调度方式,由之前执行政府的发用电计划到执行市场交易计划,市场化合同的执行、安全校核的合理性以及电量的调整情况将直接影响市场主体的经济利益。为了确保电网运行的安全、经济、稳定性,维护电力市场供需平衡,营造公平的市场交易环境,电网企业势必需要提高电力传输的响应能力,加强电力交易的统筹和协调,以保障发电、供电调度计划的合理性以及安全校核的规范性,确保调度公平。

4 电网企业的应对策略

从上述分析可以看出,发用电计划的有序放开将对电网企业产生深远影响,其不仅加速了发售侧产业结构的重新布局,挤压了电网企业的市场份额,也对电网的运营和管理带来巨大挑战。在此背景下,电网企业应积极响应改革号召,顺应改革趋势,主动服务电力市场的建设,并积极调整战略,提高市场响应能力。据此,从经营管理、规划、运营、调度等4个方面提出电网公司的适应性策略。

4.1 经营管理策略

加强企业内部经营管理能力,拓展外部增量市场,提升盈利能力。

1)做好投融资管理工作。应充分利用国家支持性政策和社会上的各种发展资金,采用多元化的融资方式,获得更多的发展资金。

2)实施成本领先和差异化战略,一是加强各类资产的成本管理,包括合理增加有效资产、科学管理固定资产、提高资产质量等。二是增强创新能力,自发地推进战略创新、管理创新、商业模式创新和技术创新,以应对多市场主体的多样化需求。

3)拓展用电市场,大力挖掘需求侧潜力,包括为发电企业与用电户直接交易创造良好的条件,提高用电需求;推进电能替代工作,如在城市科学布局电动汽车充电桩、有轨电车的配套供电建设,不断推广电锅炉、地能热泵、电采暖、电力排灌等电能替代技术等等;加强需求侧管理,推广冰蓄冷空调,减少电网高峰时段的空调用电负荷,平衡电力供应的稳定性,提高电能利用效率。

4.2 电网规划策略

有序放开发用电计划工作对于电网规划提出了新的要求,应加强投资管理,提升负荷预测准确性,依托智能电网建设,做好规划工作。

1)完善新项目的投资管理。加强投资项目可行性分析的科学性,通过全方位的论证和多渠道的相互佐证,对新项目投资的经济效益做出更为准确的评价,以此提升投资效率,降低风险和损失。

2)进行多元化的电力负荷预测。随着电力市场放开,应采用多元化的负荷预测方法,提高负荷预测准确性,提升服务质量。

3)加快智能电网建设。一是在满足投资效率的前提下,建设更灵活的电力网架结构,以适应大量可再生能源和分布式能源等市场主体的接入。二是提升电网的自动化水平,采用配电自动化技术能够提升配电的可靠性和整体效率,减少电网故障的出现,进一步降低配电过程的成本。三是充分利用信息通信技术,构建电网企业自身的大数据平台,并通过大数据处理方法的综合运用,挖掘数据背后的潜在价值,为电网企业的决策提供依据。

4.3 电网运营策略

随着交易市场的放开,市场供需波动性以及各种突发情况发生的概率增加,电网企业应进一步提高软硬件水平,强化运营管理。

1)把握电网运行规律,改进电网管理方式。一是以电网区域或电网功能作为依据,理顺各级电网

企业的产权关系,明确分工和职责,消除电网管理工作中的盲点。二是建立健全的电网企业安全管理制度,梳理电力市场竞争形势下电网安全管理的关键点,充分做好电网运维工作,将市场不确定性对电网的影响降到最低。

2)鼓励电网运营过程中技术创新。一是引进高新技术电网装备,达到降低电网能耗、提高电网运行的安全性和经济性的目的。二是提高持续创新能力,推进智能电网前沿技术的研究,积极应对未来智能电网运营中可能出现的各类安全性、稳定性、故障性等问题,提高电网企业驾驭复杂智能电网的运营能力。

4.4 电网调度策略

国内外电力市场化改革实践以及电网企业运营经验早已表明,提高电网调度的高效性,是保障电网运营安全性、稳定性和经济性的关键。而要在更快的时间内和更多的空间范围完成电力传输的响应和电力交易的协调,必须要坚持电网的统一调度,确保市场的公平、有效运行。

1)严格执行调度规则和市场运营规则,公平执行调度计划,促进市场主体间的公平交易。

2)建立健全的电网调度制度,明确不同级别的电网调度的响应时间和响应范围,制定不同市场阶段下的安全校核、阻塞管理、事故处理规则,提高市场环境下载电网调度的处置能力。

3)充分利用信息化和大数据平台,提高各类电网调度的智能化决策水平,实现调度管理的精益化和规范化。

5 结 语

有序放开发用电计划是发、售电侧改革的重要组成部分和关键点,其有助于进一步扩大市场交易范围,培育多元的市场主体,形成电力市场化交易环境。同时,发用电计划的放开也将深刻改变电网企业的运营环境,打破传统的电力产业格局。据此,在借鉴国际经验的基础上,结合市场环境下电网企业面临的挑战,从经营、规划、运营、调度4个方面提出应对策略:一是通过成本领先和差异化战略加强企业内部经营管理能力,实施电能替代拓展外部增量市场,提升盈利能力;二是加强投资管理,依托智能电网建设,做好规划工作;三是改进电网管理方式,理清市场环境下载管理工作的薄弱点,通过技术创新和管理

创新,提升运营能力;四是加强调度管理,完善调度规则,并利用先进的信息技术手段实现调度管理的精益化和规范化,保障调度的公平有效。

参考文献

[1] Hunt S. Making Competition Work in Electricity [M]. New York: John Wiley & Sons, 2002.

[2] Munasinghe M. Principles of Modern Electricity Pricing [J]. Proceedings of IEEE, 1981, 69(3): 332 - 348.

[3] Oyama T. Applying Mathematical Programming to Measure Electricity Marginal Costs [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, PAS - 102 (5): 1324 - 1330.

[4] Baughman M L, Lee W W. A Monte Carlo Model for Calculating Spot Market Prices of Electricity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(2): 584 - 590.

[5] David A K. Competitive Bidding in Electricity Supply [C]. IEEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution, 1993, 140(5): 421 - 426.

[6] Vickery W. Counter Speculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders [J]. Journal of Finance, 1961, 16 (1): 8 - 37.

[7] Hobbs B F, Metzler C B, Pang J S. Strategic Gaining Analysis for Electric Power Systems: An MPEC Approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (2): 638 - 645.

[8] Gan D, Bourcier D V. A Single - period Auction Game Model for Modeling Oligo - polistic Competition in Pool - based Electricity Markets [C]. Power Engineering Society Winter Meeting, 2002(1): 101 - 106.

[9] 李虹. 电力市场设计:理论与中国的改革 [J]. 经济研究, 2004(11): 119 - 128.

[10] 张华祥. 中国电力行业价格形成机制与改革模式研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2014.

[11] 张昕竹, 冯永茂, 马源, 中国电网管理体制变革研究 [M]. 南昌: 江西人民出版社, 2010.

[12] 曾鸣. 电力市场理论及应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

[13] 曾鸣, 程芸, 丁声高. 我国电力市场的实施方案和相关问题研究 [J]. 电网技术, 2000, 24(2): 69 - 73.

[14] 曾鸣. 重视对大用户直购电的研究 [J]. 中国电力企业管理, 2003(5): 32 - 35.

[15] 于尔铿, 周京阳, 张学松. 电力市场竞价模型与原理 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 24 - 27.

[16] 于立宏, 郁义鸿. 需求波动下的煤电纵向关系安排与政府规制 [J]. 管理世界, 2006(4): 73 - 86.

[17] 史连军, 韩放. 中国电力市场的现状与展望 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(3): 1 - 4.

作者简介:

魏 阳(1987), 硕士、工程师, 研究方向为运营监控管理。
(收稿日期: 2018 - 07 - 03)

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^{1,3}, 万小花², 李浩然³

(1. 贵阳职业技术学院, 贵州 贵阳 550081; 2. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院, 甘肃 兰州 730050;
3. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:目前在风电并网系统长期可靠性评估中, 风速多采用威布尔概率分布模型, 输电线路故障率多采用年均值故障率, 其评估结果无法反映系统可靠性随时间的变化情况。提出了综合考虑风速和输电线路故障率周期时变特性对电网的影响进行可靠性评估。在风电场出力方面, 建立了风速的时间周期时变模型, 并根据风机输出功率与风速的函数关系进一步建立了风电场的出力模型; 在输电线路故障率方面, 通过统计气象引起的输电线路故障次数计算历史同期各月故障率, 用曲线拟合模拟其变化规律, 建立了输电线路故障率周期时变模型。基于上述两种模型, 用蒙特卡洛模拟法, 对风电并网系统的时变可靠性进行评估, 最后用算例进行了验证, 评估结果可为电网中长期调度、运维及检修决策等提供参考。

关键词: 风速模型; 曲线拟合; 线路故障率; 风电并网系统; 时变可靠性

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2018)05-0034-09

Reliability Evaluation of Wind Power Integrated Systems Considering Periodic Time – varying Characteristics of Wind Speed and Failure Rate of Lines

Yan Qin^{1,3}, Wan Xiaohua², Li Haoran³

(1. Guiyang Vocational and Technical College, Guiyang 550081, Guizhou, China;
2. Economic Research Institute of State Grid Gansu Electric Power Company,
Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment &
System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The Weibull distribution model of wind speed and the annual average value of failure rate of lines are currently used in reliability evaluation of wind power integrated system, but it cannot reflect the time – varying characteristics of system reliability. The influence of periodic time – varying characteristic of wind speed and failure rate of transmission lines on power system is comprehensively considered. In the aspect of wind farm output, the periodic time – varying model of wind speed is established, and according to the functional relationship between output power and wind speed, output power model of wind farm can be determined. In the aspect of failure rate of transmission lines, the historical monthly failure rate is calculated by statistic failure numbers of lines, and the periodic variation failure rate model of transmission lines is established through curve fitting method. Based on the proposed models and Monte Carlo simulation, the time – varying reliability evaluation of wind power integrated system can be achieved. The validity of the proposed method is verified by a case analysis. And the results of reliability evaluation can provide a reference for mid – long term dispatching and maintenance decision.

Key words: wind speed model; curve fitting; failure rate of transmission lines; wind power integrated system; time – varying reliability

0 引 言

随着电力系统的不断发展,其运行可靠性受气

象因素的影响也越来越大。在发电侧,随着全球范围内的能源危机问题日益严峻,新能源发电技术得到了迅速发展。风力发电以其清洁、可再生、建设周

期短、技术较为成熟等特点在新能源发电中占据了重要地位。由于风电具有明显的随机性、间歇性特点,大规模的风电接入电网势必会影响电网的运行可靠性;在输电侧,随着电压等级不断提高,架空输电线路的跨度也越来越大,且其长期暴露在大气环境中,极易受雷电、大风、沙尘、冰雪等气象灾害的影响导致故障停运,从而影响电网的运行可靠性。

气象领域的研究指出:气候系统的演变过程具有自记忆特性,在不同的时间标度上有相似的统计特性,即大气环境具有时间周期性^[1]。因此,在气象因素影响下的电网可靠性也应是随时间变化的,评估电网的时变可靠性对系统规划、中长期调度和月发电计划制定等具有重要意义。

在研究气象因素导致风力发电随机性对电网可靠性的影响时,因为风电机组出力与风速直接相关,所以目前许多文献对风速预测模型进行了研究。现有的风速模型主要有:机器学习模型、时间序列模型和概率分布模型^[2]。文献[3-6]采用了各种机器学习方法及智能算法对风速进行短期预测。机器学习方法能考虑多种变量对风速的影响,预测精度较高,但模型复杂,计算量大。风速的时间序列模型通常适用于风速的中短期预测,文献[7-9]在自回归动平均模型(autoregressive integrated moving average model, ARIMA)的基础上进行了改进,提高了风速预测精度,风速时间序列模型的阶数对预测精度影响较大,低阶模型建模比较容易但误差较大,高阶模型参数估计困难。风速的概率分布模型反映的是风速长期的统计规律,通常适用于长期风速预测。常用的风速概率分布模型主要有瑞利分布、威布尔分布、对数正态分布等,其中威布尔分布使用最为广泛^[10]。文献[11-12]用威布尔分布对实际风速数据进行模拟,取得了较好的效果。概率分布模型较为简单,使用方便,但是精度不高,且不能反映风速的时间变化特征。在风电接入对电网可靠性的影响方面,文献[13-16]从不同角度对风电出力随机性下的电网运行可靠性进行了评估。

在研究气象因素导致线路故障对电网可靠性的影响时,现有文献的研究重点主要关注气象因素对线路可靠性模型的影响。文献[17]对一些气候因素,如每年的极大风速和冰层厚度等对输电线路可靠性的影响进行了分析,研究结果显示气候变化会显著地影响输电线路的可靠性。文献[18]对极端

气候事件导致的连锁停运故障进行研究,用极端气候随机模型和连锁故障停运模拟相结合的方法对电网可靠性进行评估。文献[19]分析了气候变化对电力系统元件可靠性的影响,提出了极端天气下提高电力系统弹性的防御策略。文献[20-22]提出一种月时间尺度下的输电线路时变故障率模型来反映气象灾害影响下线路故障与时间相关的规律,并用 IEEE-RTS79 系统作为算例计算了系统时变的可靠性指标。

综上所述,气象因素对风力发电和输电线路运行均有较大影响,但目前同时考虑气象因素对这两者影响条件下的风电并网系统可靠性评估还很缺乏。针对这一不足,综合考虑了风电出力和输电线路故障率周期时变特性对电网的影响,建立了风速和输电线路故障率的周期时变模型。在上述模型的基础上,用蒙特卡洛模拟法对风电并网系统的时变可靠性进行评估,最后用算例进行了验证。

1 基于风速周期时变特性的风电场出力模型

从中国气象数据网的中国地面气候资料日值数据集^[23]中选取了甘肃民勤气象站 2011—2015 年的风速数据,对不同时间尺度下的风速变化特征进行了分析。根据整理的风速数据,绘制出 2011—2015 年日平均风速的时序图,如图 1 所示。

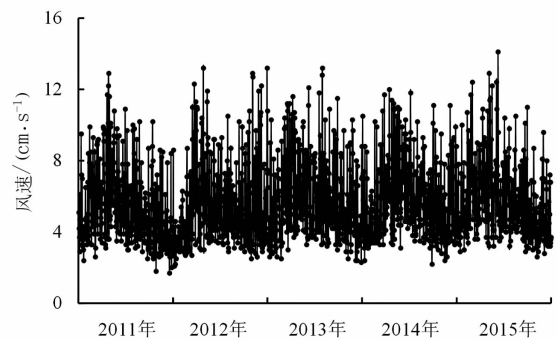


图1 民勤气象站 2011—2015 年日平均风速

将时间按年进行划分后可以看出,每一年风速的变化规律是相似的,即风速以年为时间尺度时表现出周期性。因此,可用累年均值分析风速在一年内的变化规律。以天为单位将累年日平均风速按时间顺序进行排列,将累年月平均风速用光滑曲线连接起来表示其变化趋势,二者绘制在一幅图上,如图 2 所示。

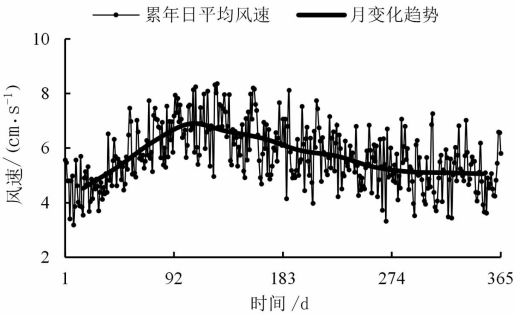


图2 2011—2015年累年日平均风速及月变化趋势

可见,风速以年为时间尺度时主要表现出周期特征,以月为时间尺度时表现出全年随时间的主要变化趋势,以日为时间尺度时在月变化趋势附近表现出波动特征。这里将风速的这种多时间尺度变化规律概括为风速的周期时变特性。

1.1 风速的周期时变特性建模

由上述分析可知,同一地区每一年风速的变化规律是相似的。因此,其周期特征可以通过累年均值来反映。以累年月平均数据为样本,用拟合函数 $f(t)$ 表示其变化趋势;用累年日平均风速和拟合函数值作差得到波动量,用服从某一概率分布的随机变量 $\varepsilon(v)$ 模拟其波动特征。最后将拟合函数与随机变量相叠加得到风速的周期时变模型 $F(t)$ 。

采用曲线拟合法根据具体的风速样本建立不同地区的风速周期时变模型。用拟合优度确定拟合函数形式及概率分布类型,用最小二乘法确定模型中的待定参数值。曲线拟合法是在建模过程中一种常用的数据处理方法。其思路是,用某种方法寻找一条光滑曲线使其尽量逼近样本数据。比较常用的曲线拟合方法是最小二乘法。

最小二乘法曲线拟合的原理是:对于一组已知的数据集 $\{(x_i, y_i)\} (i = 0, 1, 2, \dots, n)$, 构建一个函数 $g(a, x)$, 其中 a 为待定的参数向量, 通过使误差平方和 S_E 最小来确定函数 $g(a, x)$ 中的未知参数, 计算误差平方和的公式如式(1)。

$$S_E = \sum (g(a, x_i) - y_i)^2 \tag{1}$$

式中函数 $g(a, x)$ 称为拟合函数或最小二乘解。使用 Matlab 软件中的曲线拟合工具箱来实现曲线拟合, 计算拟合优度和确定拟合模型中的参数值。

下面以民勤气象站 2011—2015 年的风速样本为基础, 详细介绍风速周期时变模型的建立过程。

1.1.1 风速月变化趋势拟合

首先对风速的月变化趋势进行曲线拟合, 以累

年月平均风速作为纵坐标, 以每月天数的中位数作为横坐标, 得到图 3 中的散点。使用 Matlab 曲线拟合工具箱中的傅里叶函数和高斯函数进行拟合, 拟合优度中 R^2 为可决系数, 越接近于 1 拟合效果越好; RMSE 为均方根误差, 越接近于 0 拟合效果越好。拟合优度如表 1 所示。

表 1 风速月变化趋势拟合函数拟合优度

傅里叶函数	R ²	RMSE	高斯函数	R ²	RMSE
一阶	0.857 3	0.321 5	一阶	0.633 6	0.485 7
二阶	0.981 1	0.135 0	二阶	0.985 1	0.120 0
三阶	0.996 3	0.072 7	三阶	0.987 9	0.152 7

从表 1 可以看出, 二阶傅里叶函数与三阶傅里叶函数的拟合优度接近, 但三阶傅里叶函数表达式更为复杂, 待定参数更多, 因此为了降低复杂度, 这里选择二阶傅里叶函数作为拟合函数, 其函数表达式为

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) \tag{2}$$

用最小二乘法可计算出拟合函数中的待定参数值, 如表 2 所示。

表 2 风速月变化趋势拟合函数中待定参数的拟合值

待定参数	拟合值	待定参数	拟合值
a_0	4.767	a_2	-0.218
a_1	-0.618	b_2	0.753
b_1	1.632	ω	0.011

确定参数值后可绘制出拟合曲线, 将其与累年月平均风速比较, 如图 3 所示, 从图中可以看出采用二阶傅里叶拟合函数能较好地反映风速的月变化趋势。

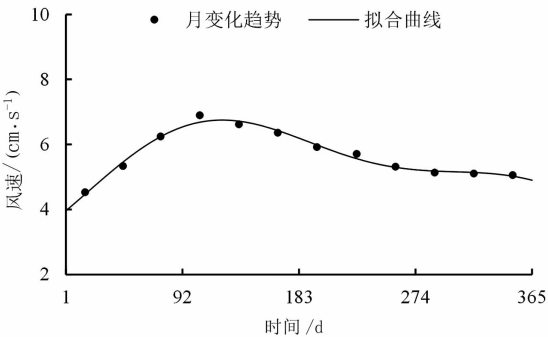


图3 风速月平均风速及拟合曲线

1.1.2 风速波动分量拟合

风速的波动分量是累年日平均风速与拟合函数值的差值, 表达式为

$$\Delta v(t)=v_0(t)-f(t) \tag{3}$$

式中: $\Delta v(t)$ 是第 t 天风速的波动分量; $v_0(t)$ 是风速在第 t 天的累年日均值; $f(t)$ 是第 t 天的拟合函数值。

根据上述的风速样本及拟合函数值计算出的 $\Delta v(t)$ 在零值附近来回波动,具有随机性,可看作是服从某一概率分布的随机变量 $\varepsilon(v)$,与时间无关。绘制 $\Delta v(t)$ 的频率直方图,此直方图的矩形顶边接近一光滑曲线,该曲线就是随机变量 $\varepsilon(v)$ 服从的概率密度函数曲线。同样地,运用曲线拟合的方法可确定风速波动分量的概率分布模型及其参数。随机变量 $\varepsilon(v)$ 有正有负,因此应选取横坐标能取到负值的概率密度函数。下面分别选取了正态分布、三参数伽马分布及三参数威布尔分布对其进行拟合,拟合优度如表3所示。

表3 风速波动分量概率分布拟合优度		
概率分布模型	R ²	RMSE
正态分布	0.801 0	0.045 85
三参数威布尔分布	0.804 4	0.045 57
三参数伽马分布	0.803 5	0.046 19

拟合优度的结果显示三参数威布尔的拟合效果较好,因此选择三参数威布尔分布作为风速波动分量的概率分布模型,其概率密度函数为

$$\varepsilon(v)=\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{v-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}e^{-\left(\frac{v-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}} \tag{4}$$

式中: α 为尺度参数; β 为形状参数; γ 为位置参数。用最小二乘法确定参数值,如表4所示。

待定参数	拟合值
α	3.61
β	2.73
γ	-3.17

确定参数值后可求解出对应的三参数威布尔分布概率密度函数,风速波动分量的频率直方图及概率密度函数拟合曲线如图4所示。可以看出三参数威布尔分布较好地体现了风速波动分量的概率分布特征。

1.1.3 风速的周期时变模型

所举例中风速的月变化趋势用二阶傅里叶拟合函数 $f(t)$ 来表示,波动分量用服从三参数威布尔分布的随机变量 $\varepsilon(v)$ 来表示,风速的周期时变模型为二者的叠加,表达式为

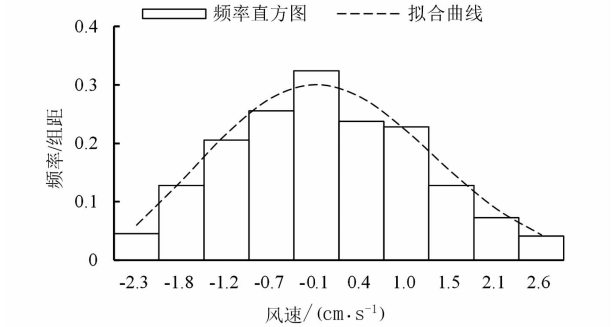


图4 风速波动分量频率直方图及概率密度拟合曲线

$$F(t)=f(t)+\varepsilon(v) \tag{5}$$

式中, $F(t)$ 为风速周期时变模型在第 t 天的模拟值。

实际风速值与模型模拟值的比较如图5所示,可以看出二者能较好地吻合。

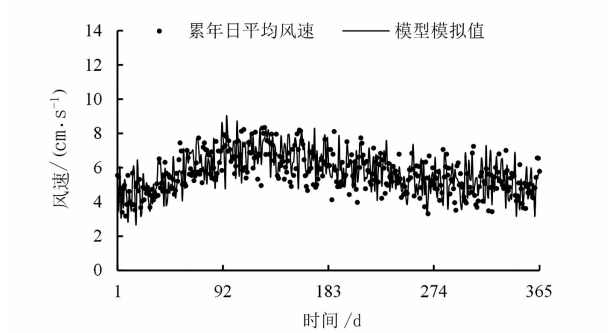


图5 累年日平均风速与模型模拟值

1.2 计及风速周期时变特性的风电场出力模型

气象站的标准观测高度距地面10 m,因此在计算风机出力时需将风速换算到风机轮毂高度。根据GB/T 18710-2002《风电场风能资源评估方法》^[24],对不同高度的风速进行换算,公式为

$$v_2=v_1\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^a \tag{6}$$

式中: a 为风切变指数; v_2 为高度 z_2 的风速; v_1 为高度 z_1 的风速。风切变指数可用式(7)计算:

$$a=\frac{\lg(v_2/v_1)}{\lg(z_2/z_1)} \tag{7}$$

式中, v_1 、 v_2 分别为高度 z_1 、 z_2 下风速的实测值。若没有不同高度的实测风速数据,风切变指数 a 可取0.143作为近似值。

通过风机出力与风速之间的函数关系^[25],可得到风电场的出力模型,其函数表达式如下:

$$P_t=\begin{cases} 0 & 0\leq V_t\leq V_{ci} \\ (A+B\times V_t+C\times V_t^2)P_r & V_{ci}<V_t\leq V_r \\ P_r & V_r<V_t\leq V_{co} \\ 0 & V_t>V_r \end{cases} \tag{8}$$

式中： P_t 为第 t 天的风电场出力， P_r 为风电场装机容量，MW； V_t 为第 t 天的风速； V_{ci} 、 V_r 、 V_{co} 分别表示风机的切入风速、额定风速和切除风速，m/s；中间变量 A 、 B 和 C 可由以下公式表达：

$$A = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left[V_{ci}(V_{ci} + V_r) - 4(V_{ci} \times V_r) \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right] \quad (9)$$

$$B = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left[4(V_{ci} + V_r) \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right)^3 - (3V_{ci} + V_r) \right] \quad (10)$$

$$C = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left[2 - 4 \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right] \quad (11)$$

将由风速的周期时变模型 $F(t)$ 模拟生成的时变风速作为变量 V_t 代入式(8)中，可得风电场出力的周期时变模型 P_t 。

2 输电线路故障率的周期时变模型

随着电压等级不断提高，架空输电线路的跨度也越来越大，且其长期暴露在大气环境中，极易受雷电、大风、沙尘、冰雪等气象灾害的影响。文献[26-27]指出气象灾害是造成架空输电线路故障停运的主要原因。目前电力系统可靠性评估中线路故障率常采用多年统计得到的年均值进行计算，而实际上由于气象灾害具有明显的时空分布特征，因此受其影响，输电线路的故障率也是随时间、空间变化的。下面借鉴文献[20]的研究思路和研究方法，建立了输电线路周期时变模型。

2.1 历史同期故障率统计

与风速类似，从年时间尺度来看气象灾害也具有周期性，例如中国每年的1—2月易发生冰雪灾害，每年的7—8月雷电灾害频发，由气象导致的线路故障频率也随之变化。因此，基于多年的气象灾害导致线路故障的记录，按月进行统计，可计算得到线路各月的历史同期故障率。

单条输电线路历史同期月故障率可以表示为

$$\lambda_k(m) = \frac{\sum_y n_{kym}}{YT_m L_k} \times 100 \quad m = 1, 2, \dots, 12 \quad (12)$$

式中： $\lambda_k(m)$ 表示线路 k 在历史同期的第 m 月的故障率，次/(100 km·月)； n_{kym} 为线路 k 在第 y 年的 m 月的故障次数； T_m 表示第 m 月的时间； Y 为统计的总年数； L_k 表示线路 k 的长度，km。

式(12)可推广到计算相似气象条件下某一地区多条线路的历史同期各月故障率，公式为

$$\lambda(m) = \frac{\sum_k (\lambda_k(m) \times L_k)}{\sum_k L_k} \quad (13)$$

式中， $\lambda(m)$ 表示同一电压等级线路在历史同期的第 m 月的故障率，次/(100 km·月)。

根据甘肃电网2014—2016年330 kV输电线路故障记录进行统计，用式(12)、式(13)计算出甘肃地区输电线路的历史同期各月故障率，并与年均值故障率进行比较，如图6所示。

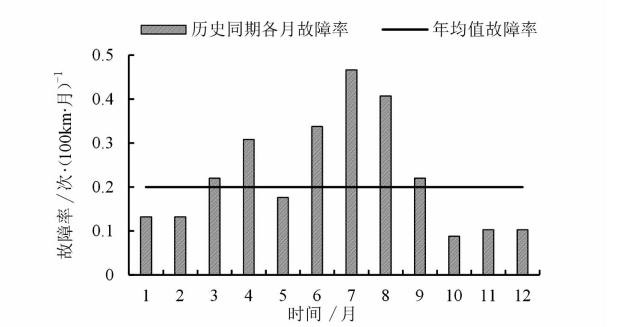


图6 甘肃地区线路历史同期各月故障率与年均值故障率

2.2 输电线路周期时变故障率模拟

基于上面得到的历史同期故障率，可进一步用曲线拟合的方法模拟其变化规律，用拟合函数 $H(t)$ 来建立输电线路故障率的周期时变模型。

以图6中甘肃地区线路的历史同期各月故障率为样本，用不同阶数的傅里叶函数和高斯函数对其进行曲线拟合，其拟合优度如表5所示。

表5 甘肃地区线路历史同期各月故障率拟合优度

傅里叶函数	R ²	RMSE	高斯函数	R ²	RMSE
一阶	0.707 10	0.081 08	一阶	0.664 3	0.081 84
二阶	0.883 2	0.059 13	二阶	0.828 2	0.071 70
三阶	0.967 0	0.038 52	三阶	0.905 1	0.075 37

从表5中可以看出，用三阶傅里叶函数对两地区的故障率进行拟合均能取得较好的拟合效果，因此选用三阶傅里叶函数作为拟合函数，其函数表达式为

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) + a_3 \cos(3\omega t) + b_3 \sin(3\omega t) \quad (14)$$

用最小二乘法计算出拟合函数中的待定参数，如表6所示。

确定参数值后可绘制出对应的拟合曲线，历史

同期故障率及拟合曲线如图 7 所示。

表 6 线路故障率拟合函数中待定参数的拟合值

待定参数	拟合值	待定参数	拟合值
a_0	0.240 8	b_2	0.019 7
a_1	-0.101 3	a_3	0.045 0
b_1	-0.096 9	b_3	0.026 4
a_2	-0.077 8	ω	0.598 9

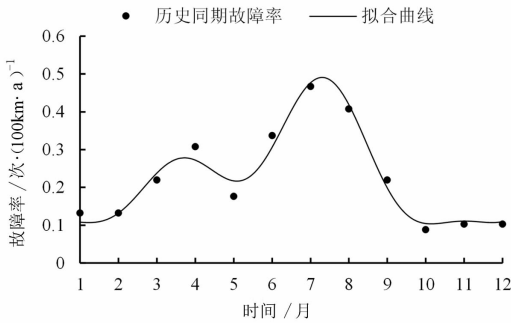


图 7 甘肃地区线路历史同期各月故障率及拟合曲线

从图 7 中可以看出拟合曲线与历史同期故障率是基本吻合的,且根据表 5 可知三阶傅里叶函数的拟合精度较高,说明该拟合函数能较好地反映故障率的时变特征。

3 风电并网系统可靠性评估方法

将前面建立的风速和输电线路故障率的周期时变模型运用到传统的电力系统可靠性评估中,得到了综合考虑气象因素对风电出力及输电线路故障率影响下的风电并网系统时变可靠性评估方法。

3.1 评估指标

根据所建立的风速周期时变模型,可在发电侧模拟风电场出力的随机性、季节性等特征;根据所建立的输电线路故障率的周期时变模型,可在输电侧模拟气象灾害影响下的线路故障率的时变特征。将二者结合起来,运用蒙特卡洛模拟法,可计算风电并网系统的时变可靠性,将系统各月的失负荷概率(loss of load probability, LOLP)和电力不足期望(expected demand not supplied, EDNS)作为可靠性指标对风电并网系统的时变可靠性进行评估。

3.2 评估流程

基于风速和输电线路故障率周期时变模型的风电并网系统时变可靠性评估的流程如图 8 所示。

用蒙特卡洛模拟法对风速周期时变模型进

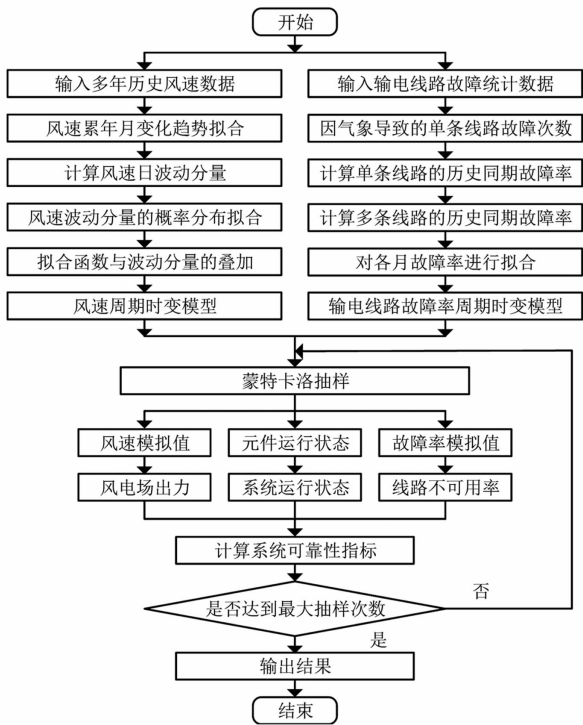


图 8 基于风速和线路故障率周期时变模型的风电并网系统可靠性评估流程

行抽样时,由于模型中有一部分是随机变量 $\varepsilon(v)$,因此每次抽样首先需要生成服从拟合得到的概率分布的随机数,再与 $f(t)$ 叠加得到第 i 次抽样的风速模拟值 $F_i(t)$ 。然后根据考察的时间区间产生 $[t_1, t_2]$ 之间均匀分布的随机正整数 t_i ,其中 t_1, t_2 分别为抽取时间区间的上、下限。例如在计算系统一月份的可靠性指标时 $t_i \in [1, 31]$,抽取的风速表达式为

$$v_i = F_i(t_i), t_i \in [t_1, t_2] \tag{15}$$

式中: v_i 为第 i 次抽取的风速值; $F_i(t_i)$ 为第 i 次抽样的风速周期时变模型生成的第 t_i 天的风速模拟值。进一步由式(8)可计算出风电场的出力。各月 t_i 所对应的抽样时间区间如表 7 所示。

表 7 各月 t_i 对应的抽样区间

月份	抽样时间区间 $[t_1, t_2]$	月份	抽样时间区间 $[t_1, t_2]$
1 月	[1, 31]	7 月	[182, 212]
2 月	[32, 59]	8 月	[213, 243]
3 月	[60, 90]	9 月	[244, 273]
4 月	[91, 120]	10 月	[274, 304]
5 月	[121, 151]	11 月	[305, 334]
6 月	[152, 181]	12 月	[335, 365]

输电线路采用两状态模型,即正常运行状态和故障停运状态,其不可用率的表达式为

$$U=\frac{\lambda}{\lambda+\mu}\tag{16}$$

式中： U 为线路的不可用率； λ 为故障率； μ 修复率。在所提出的风电并网系统可靠性评估中，关注的是月时间尺度的可靠性指标，因此 λ 采用所提出的输电线路故障率周期时变模型，而 μ 基本上与时间无关，因此可取多年统计值进行计算。

用蒙特卡洛模拟法对系统中各元件的运行状态进行抽样时，用产生随机数的方法来模拟各个元件的状态，通常是产生 $[0,1]$ 之间均匀分布的随机数 R_j ，每个元件的状态由式(17)确定：

$$s_j=\begin{cases}0 & R_j>U_j\\1 & 0\leq R_j\leq U_j\end{cases}\tag{17}$$

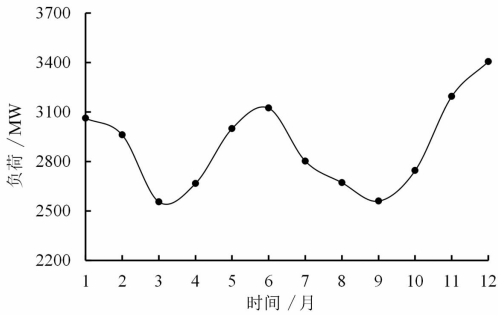
式中：0表示正常工作状态；1表示故障停运状态； U_j 是第 j 个元件的不可用率。

按上述方法多次对某月的风电场出力、线路故障率和系统中各元件状态进行抽取，可模拟系统各种运行状态，进而计算得到系统在该月的失负荷概率(LOLP)和各月的电力不足期望(EDNS)。

4 算例分析

按照前述方法建立了甘肃瓜州、马鬃山、玉门、民勤、环县等5个风电集中地区的风速周期时变模型和甘肃地区的输电线路故障率周期时变模型。根据图8所示的可靠性评估流程，用Matlab软件进行编程，以改造的IEEE-RTS79系统为算例，对其时变可靠性进行了评估。

原IEEE-RTS79系统中不含风电机组，现分别将节点22、15、13、1和7处的1台50 MW、12 MW、197 MW、20 MW和100 MW的发电机组替换为等装机容量风电场，系统的结构及各元件参数见文献[28]，算例中的负荷采用系统各月的峰值负荷，如图9所示。



算例对Case 1和Case 2两种情形下系统各月的失负荷概率和电力不足期望指标进行了计算。两种情形下所采用的风速模型和线路故障率模型如表8所示。

表 8 Case 1 和 Case 2 的计算条件说明

计算条件	风速模型	线路故障率模型
Case 1	威布尔模型	年均值模型
Case 2	周期时变模型	周期时变模型

计算所得结果如图10和图11所示。

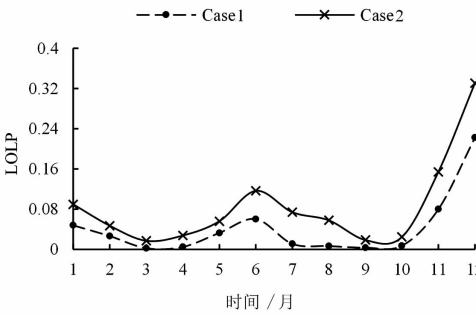


图 10 Case 1 和 Case 2 情形下系统各月的 LOLP

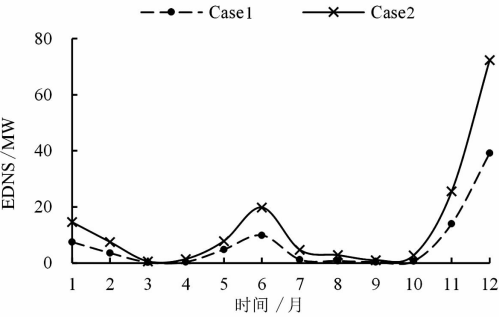


图 11 Case 1 和 Case 2 情形下系统各月的 EDNS

系统可靠性指标中失负荷概率LOLP和电力不足期望EDNS越大，说明系统可靠性越低；反之，系统可靠性越高。目前风电并网系统可靠性评估多采用Case 1的计算条件，即风速模型采用威布尔分布，线路故障率模型采用年均值故障率。但威布尔分布本质上是一种概率分布模型，不具备时间属性，并且年均值故障率也无法反映其各月的差异，因此采用上述条件计算得到的系统各月可靠性指标并不能真实反映系统可靠性随时间的变化情况。从图10和图11中可以看出，Case 1所得结果比Case 2偏低，即采用传统方法评估风电并网系统各月可靠性时，可能会造成对可靠性的低估。这是因为，相比于Case 1，Case 2的计算条件充分考虑了气象因素导致的风电出力和线路故障率周期时变特性对电网

的影响,更加接近实际。

利用所提方法能真实反映系统可靠性随时间的变化情况,使系统运行人员提前对系统各月的可靠性水平有所把握,事先制定好相应的降风险措施。例如,在运行方面,加强气象灾害多发时段相关线路的巡检工作;检修方面,事先制定好高风险时段的应急措施并准备好事故抢险物资;调度方面,在制定月发电计划时,可在系统可靠性较低月份限制部分风电场的出力,以减小风电出力随机性对电网的影响,同时加大部分火电机组的出力以保证供电。

5 结 语

针对现有风电并网系统可靠性评估方法不能反映系统可靠性随时间变化的问题,提出了风速和输电线路故障率的周期时变模型,并结合蒙特卡洛模拟法计算得到了风电并网系统各月的可靠性指标,通过研究得出以下结论:

1) 风速具有周期时变特性,可将其描述成月变化趋势与日波动分量的叠加。其中月变化趋势用拟合函数表示,日波动分量用服从特定概率分布的随机变量表示。通过对多年风速样本的曲线拟合来建立适应该地区风速变化规律的周期时变模型。

2) 输电线路故障大多是由气象灾害导致的,而气象灾害也具有周期时变特性。通过统计气象灾害引起的输电线路故障次数,计算得到线路的历史同期各月故障率,并用曲线拟合方法建立了输电线路故障率的周期时变模型,充分反映了气象灾害影响下输电线路故障率随时间的变化情况。

3) 将风速和输电线路故障率的周期时变模型与蒙特卡洛模拟法相结合,实现了对风电并网系统时变可靠性的评估。相比传统方法,所提方法得到的结果更能反映系统可靠性随时间变化的实际情况,评估结果可为电力系统中长期调度、运维及检修决策等提供参考。

参考文献

[1] 封国林,侯威,支蓉,等. 极端气候事件的检测、诊断与可预测性研究[M]. 北京:科学出版社,2012.
[2] 余慎思,李征,蔡旭,等. 用于风力发电仿真的多时间尺度风速建模方法[J]. 电网技术,2013,37(9): 2559-2565.

[3] Wang Shouxiang, Na Zhang, Lei Wu, et al. Wind Speed Forecasting Based on the Hybrid Ensemble Empirical Mode Decomposition and GA-BP Neural Network Method[J]. Renewable Energy, 2016, 94: 629-636.
[4] Chang G-w, Lu H-j, Chang Y-r, et al. An Improved Neural Network-based Approach for Short-term Wind Speed and Power Forecast[J]. Renewable Energy, 2017, 105: 301-311.
[5] Ren Y, Suganthan P N, Srikanth. A Novel Empirical Mode Decomposition with Support Vector Regression for Wind Speed Forecasting[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(8): 1793-1798.
[6] Ma Xuejiao, Yu Jin, Dong Qingli. A Generalized Dynamic Fuzzy Neural Network Based on Singular Spectrum Analysis Optimized by Brain Storm Optimization for Short-term Wind Speed Forecasting[J]. Applied Soft Computing, 2017, 54: 296-312.
[7] Yunus K, Thiringer T, Chen P. ARIMA-based Frequency-decomposed Modeling of Wind Speed Time Series[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2546-2556.
[8] 修春波,任晓,李艳晴,等. 基于卡尔曼滤波的风速序列短期预测方法[J]. 电工技术学报,2014,29(2): 253-259.
[9] Shukur O B, Lee M H. Daily Wind Speed Forecasting through Hybrid KF-ANN Model Based on ARIMA[J]. Renewable Energy, 2015,76: 637-647.
[10] Ozay C, Celiktas M S. Statistical Analysis of Wind Speed Using Two-parameter Weibull Distribution in Alacati Region[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 121: 49-54.
[11] Ouarda T J, Charron C, Chebana F. Review of Criteria for the Selection of Probability Distributions for Wind Speed Data and Introduction of the Moment and L-moment Ratio Diagram Methods, with A Case Study[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 124: 247-265.
[12] Wais P. A Review of Weibull Functions in Wind Sector[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 70: 1099-1107.
[13] Lannoye E, Flynn D, O'malley M. Evaluation of Power System Flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 922-931.
[14] Wan C, Xu Z, Pinson P, et al. Optimal Prediction Intervals of Wind Power Generation[J]. IEEE Transactions on

tions on Power Systems, 2014, 29(3): 1166 – 1174.

[15] Chen Z, Wu L, Shahidehpour M. Effective Load Carrying Capability Evaluation of Renewable Energy via Stochastic Long – term Hourly Based SCUC [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 188 – 197.

[16] 黄海煜, 于文娟. 考虑风电出力概率分布的电力系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2585 – 2591.

[17] Rezaei S N, Chouinard L, Langlois S, et al. Analysis of the Effect of Climate Change on the Reliability of Overhead Transmission Lines[J]. Sustainable Cities and Society, 2016, 27: 137 – 144.

[18] Francesco C, Gian L A, Eerjco Z. A Modeling and Simulation Framework for the Reliability/Availability Assessment of A Power Transmission Grid Subject to Cascading Failures under Extreme Weather Conditions [J]. Applied Energy, 2017, 185: 267 – 279.

[19] Panteli M, Mancarella P. Influence of Extreme Weather and Climate Change on the Resilience of Power Systems: Impacts and Possible Mitigation Strategies [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 127: 259 – 270.

[20] Wang J, Xiong X, Zhou N, et al. Time – varying Failure Rate Simulation Model of Transmission Lines and Its Application in Power System Risk Assessment Considering Seasonal Alternating Meteorological Disasters [J]. IET Generation, Transmission Distribution, 2016, 10(7): 1582 – 1588.

[21] 王建, 熊小伏, 梁允, 等. 地理气象相关的输电线路风险差异评价方法及指标[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1252 – 1259.

[22] 王建, 熊小伏, 李哲, 等. 气象环境相关的输电线路故障时间分布特征及模拟[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 109 – 114.

[23] 中国气象数据网. 中国地面国际交换站气候资料日值数据集[DB]. http://data.cma.cn/data/detail/data-Code/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY.

[24] 风电场风能资源评估方法: GB/T 18710 – 2002[S], 2002.

[25] Wangdee W, Billinton R. Considering Load – carrying Capability and Wind Speed Correlation of WECS in Generation Adequacy Assessment[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 734 – 741.

[26] 陈丽娟, 胡小正. 2010 年全国输变电设施可靠性分析[J]. 中国电力, 2011, 44(6): 71 – 77.

[27] 陈丽娟, 李霞. 2011 年全国输变电设施可靠性分析[J]. 中国电力, 2012, 45(7): 89 – 93.

[28] Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee. IEEE Reliability Test System [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047 – 2054.

作者简介:

严勤(1966), 本科、高级工程师、访问学者, 研究方向为电力系统保护自动化及新能源接入技术;

万小花(1982), 工程硕士、工程师, 主要从事新能源发电等相关研究;

李浩然(1992), 硕士, 研究方向为气象相关的电力系统可靠性评估。

(收稿日期: 2018 – 07 – 18)

=====

(上接第 28 页)

[4] 杨博麟. 高压电缆接头热老化机制的研究及其温度监测系统的设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.

[5] 任明, 彭华东, 陈晓清, 等. 采用暂态对地电压法综合检测开关柜局部放电[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2460 – 2466.

[6] 徐焰. 开关柜局部放电暂态对地电压检测技术[J]. 供用电, 2011, 28(1): 62 – 64.

[7] 孙志明. 10 kV 电缆振荡波局部放电检测技术研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.

解磊(1985), 工程师, 从事电气试验、电缆运检工作;

张增智(1979), 助理工程师, 从事配电线路运检工作、电缆运检工作;

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;

曾娜(1987), 工程师, 从事配电网生产技改大修项目管理;

李卓雯(1986), 硕士、工程师, 从事配电网运检计划管理工作。

(收稿日期: 2018 – 06 – 20)

作者简介:

韩启贺(1992), 助理工程师, 从事输配电电力电缆运维检修工作;

± 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
(西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘 要:换流阀外冷却系统的冷却方式主要有水冷却和空气冷却两种。依托±800 kV 新松换流站工程设计,对水冷却、空气冷却两种外冷却方式进行了技术经济分析、比较。结果表明,空气冷却方式无需水源、亦无排污,是一种节水、环保的冷却方式,并且运行维护相对简单;结合站用水源条件,空气冷却方式的使用期内等额年费用亦较低。推荐新松换流站阀外冷却系统采用空气冷却方式。

关键词:换流阀;外冷却系统;水冷却;空气冷却

中图分类号:TM621.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)05-0043-06

Type Selection and Design for Outside Cooling System of Converter Valve in ± 800 kV Xinsong Converter Station

Deng Xiao, He Yong, Yu Bo
(South West Electric Power Design Institute Co. Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: Water cooling and air cooling are two major methods for outside cooling system of converter valve. Based on the project design of ± 800 kV Xinsong converter station, the technical and economic analysis and comparison between water cooling and air cooling are carried out. The results shows that, air cooling method is a water-saving and environmentally friendly method without water and pollution, and its operation and maintenance are relatively simple. Moreover, combined with the condition of station water supply, the equal annual cost in the period of using air cooling method is lower. So air cooling method is recommended for outside cooling system of converter valve in ± 800 kV Xinsong converter station.

Key words: converter valve; outside cooling system; water cooling; air cooling

0 引 言

滇西北至广东±800 kV 特高压直流输电工程是贯彻落实国家大气污染防治行动计划的重点输电工程,工程建成投产后将滇西北水电送至珠三角地区,每年至少可减少珠三角地区煤炭消耗 5.2×10^6 t,减少二氧化碳排放量 1.9×10^7 t,减少二氧化硫排放量9400 t,节能减排效益明显。该工程直流输送容量为5000 MW,额定电压为±800 kV,额定电流为3125 A;西起云南省大理州±800 kV 新松换流站,东至广东省深圳市±800 kV 东方换流站,输电线路总长大约1900 km。

换流站是直流输电系统中完成交、直流电能转换的站点,而换流阀是换流站内实现交、直流电能转换的核心设备。换流阀内的晶闸管元件在运行过程中因功率损耗所转换的热量会导致晶闸管元件温度

上升,温升一旦超过晶闸管的最高结温,晶闸管就会损坏,因此换流阀需要使用冷却介质循环吸热排放到阀厅外,确保晶闸管结温保持在正常允许的范围之内^[1-4]。因此,换流阀冷却系统是确保换流阀安全可靠运行的重要保障。

±800 kV 新松换流站位于云南省大理白族自治州剑川县羊岑乡,站址海拔高度2328 m。站址附近无可靠河流水源,在20 km范围内有大干场水库、玉华水库、剑湖3个主要水库(湖泊),其富裕水量均能满足换流站用水要求;站址地区四季温差小,夏无酷暑,冬无严寒,多年极端最高气温仅32.7℃。因此,换流阀外冷却系统具有采用水冷却的水源条件,同时也具有采用空气冷却的气象条件。下面依托±800 kV 新松换流站工程设计,对水冷却、空气冷却两种外冷却方式进行了技术经济比较,完成了换流阀外冷却系统的选型与设计,最终在南方电网

域内 ±800 kV 换流站的换流阀外冷却系统设计中首次采用了空气冷却方式。

1 设计条件

1.1 水源条件

站址附近无可靠河流水源,在 20 km 范围内有大干场水库、玉华水库、剑湖 3 个主要的水库(湖泊),根据换流站用水量计算分析,3 个水库(湖泊)的富裕水量均能满足换流站的用水要求。

表 1 站址水源

水源名称	水源概况
大干场水库	水质较好,水库水位高于站址约 210 m,采用自流供水,供水管道长度 17 km。
玉华水库	水质较好,水库水位高于站址约 100 m,采用取水泵船提升取水,供水管道长度 26 km。
剑 湖	水质较差,水库水位低于站址约 140 m,采用取水泵船提升取水,供水管道长度 21 km。

1.2 环境条件

站址地区属低纬高原山地季风气候,受太阳辐射、大气环流、地理地貌等因素的相互作用,其主要气候特征是:四季温差小,垂直差异明显,雨热同季,干湿季分明,具典型的立体气候特征。夏秋两季受西南暖湿气流、海洋季风和西南季风控制,雨量充足,6 月至 9 月降雨量占全年降雨量的 80% 以上;冬春两季受南支西风气流、大陆季风控制,晴天多,日照充足,空气干燥,雨量特少。站址主要环境条件见表 2。

表 2 站址主要环境条件

项目	数值
多年平均气压/hPa	769.2
多年最高气压/hPa	782.4
多年最低气压/hPa	757.9
多年平均气温/℃	11.7
年平均最高气温/℃	19.9
年平均最低气温/℃	5.9
多年极端最高气温/℃	32.7(1977-06-18)
多年极端最低气温/℃	-11.5(1983-01-06)
最大日温差/℃	28.2
多年平均相对湿度/%	70
多年平均风速/(m·s ⁻¹)	3.1
平均最大风速/(m·s ⁻¹) (10 m 高、10 min、100 年一遇)	23.7
经常性风向	SSW
海拔高度/m	2328
地震基本烈度/度	VIII

2 换流阀冷却系统方案设计

2.1 冷却系统概述

晶闸管换流阀是换流站的核心设备之一,在换流站中承担交-直流转换功能,其内部的晶闸管元件在运行过程中将产生大量的热。大部分热需要由冷却介质通过热交换带走,才能使晶闸管元件的运行温度不高于 80℃,以保证元件的正常使用并防止其老化。因此在影响换流阀运行可靠性的多种因素中,散热是至关重要的一个。所以选择适当的冷却方式,并进行合理的设计,是使晶闸管阀的潜力得到充分发挥、提高系统可靠性不可缺少的重要环节之一。冷却介质的选择应考虑电绝缘性、化学稳定性、对材料的腐蚀性、对环境的影响和易燃性及应用的普及程度。可用的冷却介质有水、油、空气和氟利昂等,由于水在比热容、换热系数和对环境的影响等方面具有优势,综合考虑节约用水及保证冷却水的纯度,目前换流阀内冷却系统均采用闭式循环冷却水系统,冷却介质为去离子纯净水或蒸馏水。

与换流阀晶闸管元件进行了热交换而升温的阀冷却水,须经过二次冷却(外冷却)降低水温后再进入换流阀进行热交换,如此周而复始地循环。故换流阀冷却系统主要由两个循环系统组成,即阀内冷却系统和外冷却系统。

换流阀内冷却系统为闭式循环水系统,主要是为晶闸管阀提供冷却水,吸收工作中换流阀所散发出的热量,以维持换流阀的正常工作温度。外冷却系统为开式循环系统,是通过室外换热设备将换流阀内冷却水中的热量排入大气从而降低内冷却水的水温。

新松换流站直流输送容量为 5000 MW,直流额定电压为 ±800 kV,直流电流为 3125 A。±800 kV 直流场采用典型直流双极接线,换流区采用每极 2 组 12 脉动阀组串联接线。全站设极 1 高端阀厅、极 1 低端阀厅、极 2 高端阀厅、极 2 低端阀厅,相应设置 4 套换流阀组。每套换流阀组设置一套独立的阀冷却系统,4 套系统配置完全一致。换流阀采用 5 in 阀片,换流阀冷却系统主要技术参数如表 3 所示。

表 3 换流阀冷却系统主要技术参数

序号	项目	数量
1	阀最大损耗/kW	3816
2	阀冷系统额定冷却容量/kW	6000
3	内冷却水额定流量/(m ³ ·h ⁻¹)	272
4	换流阀进水温度额定值/℃	44.4
5	换流阀进水温度报警值/℃	46.4
6	换流阀进水温度跳闸值/℃	49.4
7	换流阀最高出水温度/℃	64
8	内冷却水电导率允许值/(μs·cm ⁻¹)	<0.3
9	阀入口处最大压力/MPa	0.8
10	阀体额定流量时压降/MPa	0.32
11	内冷却水含氧量/(μg·L ⁻¹)	<200

2.2 外冷却系统方案设计

换流阀外冷却系统需对阀组提供足够的冷却容量,以保证阀组安全可靠运行。换流阀外冷却系统的冷却方式主要有两种:水冷却方式和空气冷却方式,根据工程条件,可采用全水冷却、全空气冷却或空气冷却串联辅助水冷却的方式。

2.2.1 水冷却方式

水冷却方式的主要换热设备为密闭式蒸发型冷却塔,外冷却系统主要设备包括:密闭式蒸发型冷却塔、喷淋水泵、喷淋水池、喷淋水过滤及软化装置、加药装置、自循环旁路过滤系统等。

与换流阀晶闸管元件进行了热交换而升温的阀内冷却水由循环水泵升压进入密闭式蒸发型冷却塔的换热盘管内进行冷却,阀外冷却喷淋水经喷淋水泵升压后进入密闭式蒸发型冷却塔,均匀喷洒到冷却塔内的换热盘管内表面,同时冷却塔所设置的风机不停地向上抽风,使内冷却水中的热量通过喷淋水的蒸发排入大气,从而降低内冷却水的水温。冷却塔出水回流至冷却塔下面的喷淋水池中循环使用。水冷却系统流程见图1所示。

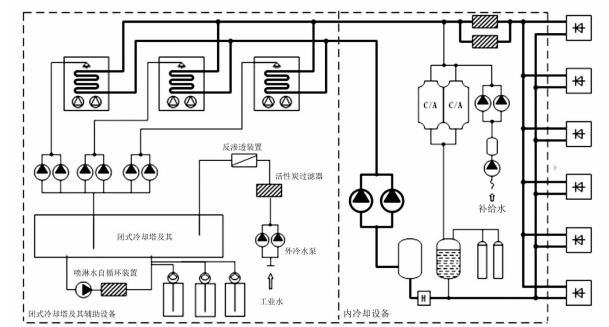


图 1 水冷却方式系统流程

由于喷淋水不断的蒸发将造成喷淋水含盐量逐渐增加,为了控制盐类浓度,防止喷淋水在冷却塔换

热盘管外壁结垢而影响传热效率,需对外冷却水系统进行连续排污并连续补水。补充水进水池之前需进行软化处理,从而控制外冷却循环水系统的浓缩倍率,使循环水的含盐量维持在某一定值。

为了减少外冷却水的耗量,未蒸发的喷淋水将回收并循环使用,需设置室外喷淋水池收集喷淋水。考虑到在喷淋补水系统发生故障或检修时冷却系统可继续运行一段时间,喷淋水池容积按 300 m³考虑。

每套换流阀外冷却系统选用 3 台冷却塔(3 × 50% 容量),当其中 1 台冷却塔被完全切除后(冷却塔进出口阀门关闭),另外 2 台冷却塔仍具有足够的冷却容量。每台冷却塔装有 2 台可调速轴流式风机,每台冷却塔对应 2 台喷淋水循环泵(一运一备)。

根据新松换流站环境条件及阀冷系统设计参数进行计算,得到每套阀组水冷却方案主要技术参数如表 4 所示。

表 4 水冷却方案主要技术参数

名称	技术参数
额定冷却容量/kW	6000
极端最高湿球温度/℃	22.1
设计介质流量/(m ³ ·h ⁻¹)	282
冷却塔进塔水温/℃	56
冷却塔出塔水温/℃	44.4
冷却塔数量/台	3
冗余量	50%
总用电负荷/kW	350
最大补水量/(m ³ ·h ⁻¹)	11
喷淋水池容积/m ³	300
外冷设备总占地面/m ²	18 × 8

换流站阀厅为“面对面”布置方式,配合电气总平面布置方案,每组 3 台冷却塔及水池布置于每极高、低端换流变压器侧空地上。为节省占地,缩短管道长度,减少管路损失,喷淋水池布置于地下,而冷却塔布置于水池上。

喷淋水泵、喷淋水过滤及软化装置、加药装置及自循环旁路过滤系统均布置在阀内冷设备间内。

2.2.2 空气冷却方式

采用空气冷却方式时,外冷却系统的主要换热设备为空气冷却器,空气冷却器由换热管束、风机、百叶窗、风箱、构架及附件(平台、梯子)等组成。

与换流阀晶闸管元件进行了热交换而升温的阀内冷却水由循环水泵升压送至室外空气冷却器内的翅片管束,同时空气冷却器所设置的风机不停地向

翅片管束送冷风,通过热水和冷风之间的热交换,使翅片管束内的水得以冷却,降温后的冷却水再进入换流阀,如此周而复始地循环^[5],其冷却系统流程见图 2 所示。

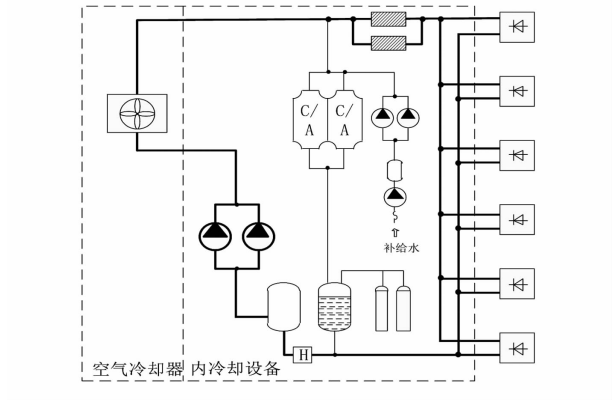


图 2 空气冷却系统流程

空气冷却器的配置需满足在极端最高温度且换流阀达到最大负荷时,其总换热面积仍有 35% 的冗余度。

根据新松换流站环境条件及阀冷系统设计参数进行计算,考虑到热岛效应影响,新松换流站的设计环境温度为极端环境最高温度加 3℃ 热岛效应,得到每套阀组空气冷却方案的主要技术参数如表 5 所示。

表 5 空气冷却方案主要技术参数

名称	技术参数
额定冷却容量/kW	6000
设计环境温度/℃	35.7
设计介质流量/(m ³ ·h ⁻¹)	282
空冷器入口水温/℃	56
空冷器出口水温/℃	44.4
空冷器数量/台	8
冗余量	35%
总用电负荷/kW	570
补水量/(m ³ ·h ⁻¹)	无
外冷设备总占地尺寸/m ²	19×13

采用空气冷却器时,因空气的换热效率比水低,设备体积较大,且考虑到安装、检修条件,空气冷却器不能紧靠阀厅布置,需布置到离阀厅较远的空地上。

2.2.3 空气冷却串联辅助水冷却方式

结合气象条件及换流阀的进水温度,当采用常规空气冷却方式不能满足冷却要求时,需串连运行一套辅助冷却系统。当环境温度或内冷水进阀温度较低时,只运行空气冷却器;当环境温度或内冷水进阀温度较高时,自动投运辅助冷却系统。

由于新松换流站极端最高气温仅为 32.7℃,气象条件较好,进阀水温与室外气温的温差较大,在夏季高温季节,采用全空气冷却方案即可满足换流阀冷却要求,故不考虑增设辅助水冷的方案。

3 换流阀外冷却系统方案选择

新松换流站换流阀外冷却系统具有采用水冷却的水源条件,同时也具有采用空气冷却的气象条件。根据站址水源及气象条件对水冷却及空气冷却两种冷却方式进行了技术经济比较,以选择经济合理的换流阀外冷却方案。

3.1 方案技术比较

两方案技术比较见表 6 所示。

表 6 换流阀外冷却方案技术比较

项目	水冷却方式	空气冷却方式
换热效率	高	低
设备占地面积	小	大
水源要求	高(两路水源)	无
补给水管	两路水源,敷设困难	一路水源,敷设较简单
耗水量	大	无
耗电量	小	大
工业水池	大	无
净水设备	处理量大	处理量小
废水排放	大	无
设备噪声	小	大
运行	较复杂	简单
维护及检修	水有腐蚀和水垢,需进行清理,工作量较大	空气腐蚀性低,无需清垢,工作量小

根据技术比较可以看出,空气冷却方案无需水源,亦无排污,运行维护简单,设备占地面积虽然较大,但相应的泵房及水池占地面积较小。水冷却方案换热效率高、占地小、噪音低,但水冷却方案对水源要求高、站外输水管线较长,喷淋水需要经常加药,冷却塔换热盘管外壁表面易结垢,运行管理维护较复杂,并且存在排污问题,对环境有一定的影响。

3.2 方案经济比较

经济比较采用年费用最小法(动态),年费用最小法之年费用的计算公式为

$$NF = (Z_0 - L) \times S_n + L \times i + U$$

式中:NF 为使用期内等额年费用;Z₀ 为工程投资;S_n 为年固定费用率,取 S_n = 0.097;U 为年运行费用;L 为工程残值,取 L = 0;i 为投资回收率,取 i = 9%;n 为经济使用年限,按 30 年考虑。

经济比较主要是有关水源、取水设施及管道、冷却设备、运行费用等方面的比较,经济比较结果如表 7 所示。

表 7 换流阀外冷却方案经济比较

编号	项目	水冷却方案 /万元	空气冷却方案 /万元
一	固定费用		
1	阀外冷却设备	10 400	11 600
2	喷淋水池	150	
3	综合水池及泵房	500	150
4	工业水泵	30	
5	工业水管	40	
6	取水许可费用	40	20
7	取水泵船	400	
8	站外补给水管	2000	200
9	净水处理设备	250	50
10	固定费用合计	13 810	12 020
二	年运行费		
1	年电费	350	600
2	年水资源费	45	
3	年加药费	80	
4	年维修费	276	240
5	年运行费合计	751	840
三	使用期内等额年费用	2091	2006

从表 7 可以看出,空气冷却方案初投资费用较水冷却方案低,且折算到使用期内的等额年费用也较低。

3.3 方案选择

合理选择换流阀外冷却系统冷却方式,对保障换流站安全运行具有重要意义。

由于新松换流站站用水源均较远,输水管线较长,敷设困难,运行管理复杂;站址区夏季气象条件较好,多年极端最高气温仅为 32.7℃,具有采用空气冷却方式的气象条件,采用空气冷却方式既能保证换流阀的安全运行,又不会使空冷系统配置过大;同时,空气冷却方式没有水的蒸发损失,也无风吹和排污损失,节水效果明显,既消除了运行维护的不便,也避免了因水雾、排水而对站区周围环境的影响,有利于保护当地的自然环境。综合技术分析 & 经济比较结果,新松换流站换流阀外冷却方案推荐采用空气冷却方案。

4 海拔高度对换流阀外冷却系统设计的影响

新松换流站站址海拔高度 2328 m,地处高海拔地区。大气压力及空气密度均受海拔高度影响,海拔

高度每升高 1000 m,相对大气压力降低约 12%,空气密度降低约 10%。因此,相对低海拔地区,新松换流站空气冷却器的设计需考虑以下几方面的影响。

4.1 对散热量的影响

随着空气密度的降低,空气冷却器的散热量会大幅度地减少。因此在空冷塔选型计算过程中,应充分考虑空气密度变化所带来的影响,如传热系数、空气质量、空气流量、风机外压等,并把这些参数融入空气冷却器的选型计算中进行精确的散热量计算。

空冷器的换热量计算公式为

$$Q = Gc_p(t_2 - t_1)$$
 (1)

式中:Q 为散热量,kW;G 为单位时间内空气质量流量,kg/s;c_p为空气定压比热,kJ/(kg·℃);t₁、t₂分别为空气进、出口温度,℃。

其中空气质量流量与空气密度成正比关系,故空气密度越低,散热量越小,因此为保证有足够的冷却能力,需加大空冷器的传热面积。

4.2 对电动机出力的影响

在海拔较高地区,电动机的出力由于空气密度的减少而有所减少(空气密度减少时,电动机的散热量减少,会影响其出力)^[6]。风机的电动机功率 P_M的计算公式为

$$P_M = K \frac{q_v P \rho_q}{1000 \eta_1 \eta_2}$$
 (2)

式中:K 为电动机容量安全系数,取 1.15;q_v为体积流量,m³/s;P 为风机全压,Pa;ρ_q为计算条件下的空气密度;η₁、η₂为分别为风机效率和传动效率。

结合当地气压 769.2 hPa,则当地空气密度是标准大气压力的 0.86 倍,因此风机输出功率仅为在海拔 1000 m 以下标准大气压力时的 86%,在选用风机的电动机时应加以考虑,根据具体情况设计风机电动机额定容量,以保证合适的裕度。

5 结 语

1)新松换流站站址 20 km 范围内有大干场水库、玉华水库、剑湖 3 个主要水库(湖泊),其富裕水量均能满足换流阀外冷却系统采用水冷却方式的用水量要求,站址具有采用水冷却方式的水源条件;站址多年极端最高气温 32.7℃,考虑 3℃热岛效应后,设计环境温度为 35.7℃,低于进阀水温 8.7℃,站址具有采用空气冷却方式的气象条件。

2)从技术比较来看,相比水冷却方式,空气冷却方式无需水源、亦无排污,是一种节水、环保的冷却方式,并且运行维护简单。从经济比较来看,结合新松换流站站用水源条件,空气冷却方式的使用期内等额年费用较低。因此,综合考虑,新松换流站换流阀外冷却系统推荐采用空气冷却方式。

3)新松换流站站址海拔高度为 2328 m,地处高海拔地区,大气压力及空气密度均受海拔高度影响,空气冷却器的设计需考虑海拔高度对于散热量、电机出力的影响。

参考文献

[1] 阮卫华,王大伟,张民幸. ±800 kV 哈密换流站阀外冷技术方案的比较与选择[J]. 电网技术, 2013, 37(7):1820-1825.

[2] 温玉婷,冷明全,吴健超. 高海拔地区换流阀冷却系统设计与选型[J]. 广西电力, 2013, 36(2):32-34.

[3] 刘辉. 换流站换流阀冷却系统的选型研究[J]. 吉林电力, 2012, 40(1):30-32.

[4] 许根富,尚立新. 高压晶闸管换流阀外水冷系统分析[J]. 中国电力, 2009, 42(12):42-44.

[5] 马义伟. 空冷器设计与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998.

[6] 陆志厚. 高海拔地区电站风机设计的相关研究[J]. 电站辅机, 2007(3):40-45.

作者简介:

邓 晓(1972),本科、高级工程师、注册公用设备工程师(给水排水),主要从事发、变电工程给排水设计研究工作;

何 勇(1986),本科、工程师、一级注册结构工程师,主要从事变电工程土建设计研究工作。

(收稿日期:2018-05-25)

(上接第 24 页)

表 2 同一 220 kV 变电站供电的 10 kV 线路合环计算值与实测值对比

项目	SCADA 合环前电流值 /A	主站计算合环前电流值 /A	SCADA 合环后电流值 /A	计算合环后电流值 /A	录波器冲击电流 /A	计算冲击电流 /A
凤凰站 935 断路器	0	0	316.80	324.87		
乐山站 925 断路器	83.36	84.95	265.92	281.25	455.22	461.84

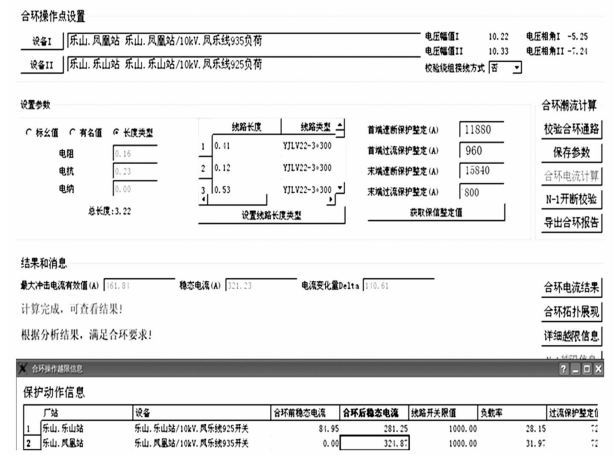


图 9 合环计算结果

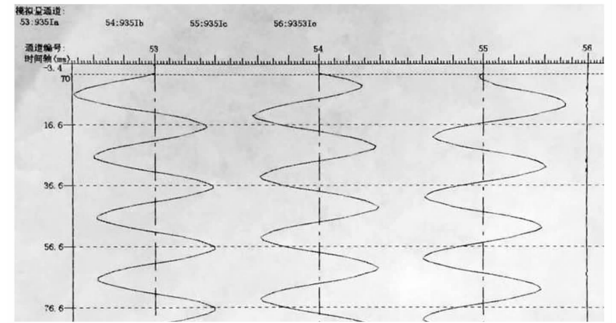


图 10 故障录波装置实测

率为 1.45%。主配电网在线校核应用计算的数据

与实际操作采集的数据值基本吻合。

4 结 语

通过配电网合环在线校核软件进行计算,耗时短,效率高。基于全网实时模型的在线计算,合环电流数据准确性大幅提高,合环操作的指导性更强,能有效保证配电网合环安全与实际合环稳态和暂态数据的对比,表明一体化配电网合环在线校核软件计算结果正确,满足实践运行要求。

参考文献

[1] 谭斌,丁宇洁,陈忠益,等. 配电网电磁合环倒供电条件分析及计算校核[J]. 中国电机(技术版), 2016(4): 1-4.

[2] 陆凌. 基于合环潮流在线计算的配网合环管理[C]. 智慧城市电力科技论坛论文集, 2014,176(1):57-59.

作者简介:

王 玺(1987),工程师,主要从事电力系统分析、电网调度工作;

刘 巍(1986),高级工程师,主要从事电网调度工作。

(收稿日期:2018-06-19)

采用经纬仪的变电站地基沉降监测分析法

王运田

(国网四川省电力公司检修公司,四川 成都 610000)

摘 要:针对地基不均匀沉降对丹巴变电站造成的影响,以及目前的监测分析方法存在过于复杂难以在高海拔、地质条件恶劣地方实际应用的现状,提出了一种采用经纬仪的监测分析法。首先采用经纬仪进行监测,然后由两点对比法对监测结果进行分析,通过分析结果判断不均匀沉降的发展趋势,最后对沉降的可能原因进行了分析并提出管控措施,有效地防止了二次灾害的发生,证明了该方法的有效性和实用性。

关键词:经纬仪;地基沉降;变电站;两点对比法

中图分类号:TH721 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2018)05 - 0049 - 05

Monitoring and Analysis Method of Foundation Settlement for Substation Based on Theodolite

Wang Yuntian

(State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:Aiming at the impact of uneven settlement of foundation in Danba substation and the situation that the current monitoring and analysis methods are too complex to be applied to the areas with high altitude and poor geological condition, a monitoring and analysis method using theodolite is proposed. Firstly, the theodolite is used for monitoring, and then the monitoring results are analyzed based on two - point comparison method, and the development trend of uneven settlement is judged by the analysis results. Finally, the possible causes of settlement are analyzed and the control measures are put forward, which can effectively prevent the occurrence of secondary hazard. So it proves the validity and practicability of the proposed method.

Key words:theodolite; foundation settlement; substation; two - point comparison method

0 引 言

地基沉降指地面下沉的现象,是目前国内各大变电站面临的一个主要地质问题。它可引起建筑物倾斜,基础开裂,给生产和生活带来很大影响,可能导致严重的财产损失。

近十年,随着变电站的加速建设,已建变电站地基下沉的情况多有发生,这对变电设备的安全生产带来巨大的安全隐患,严重的将造成重大经济损失,如在《中国电网风险管理报告(一)》中就提及了“山西某 220 kV 变电站 1998 年发生地基沉陷,直接经济损失数百万元^[1];甘肃某电厂 2003 年因地面突然下陷造成墙体开裂,直接经济损失约 48 万元^[2];某 500 kV 变电站工程在投运前发现主变压器基础与

散热器基础发生不均匀沉降导致设备受损”^[3]。可见电网运行管理不仅要对电力设备本身的安全性进行专业维护管理,还要加强对设备所在地的地基环境等基础设施进行严密的定期监测。

地基沉降是一个复杂的环境地质问题,一直受到各国学者的普遍关注。目前,国内外监测地基沉降的方法有很多种,主要采用全站仪、水准测量、双曲线法和沉降差法,都是通过线性拟合来预测地基的沉降。尽管这 4 种方法线性拟合都很好,但相对费用高,后两种误差高达 53%^[4-5],并且理论和监测手段过于复杂,需要专业测量人员才能开展,不利于国网四川检修公司所辖的藏区偏远变电站地基沉降的跟踪监测。

下面提出的根据经纬仪垂直角测量原理,采用的两点对比观测法简单,不需要专业测量人员参与,

可以由驻站运维人员经过短时间的经纬仪理论与实际操作强化训练就可独自开展,经现场实践验证可行。对站址边远的藏区高海拔变电站具有极大的优势。同时针对地基沉降形成、发展过程进行了大量研究,分别从地面沉降成因、产生机理、监测数据分析和防治5个方面系统地介绍了丹巴变电站沉降研究现状。这些工作为开展地基沉降的防治工作奠定了良好的基础。

1 丹巴变电站地基沉降概述

丹巴变电站位于四川省甘孜州丹巴县,海拔2158 m,于2013年10月投入运行,担负着藏区水电送出的重要任务。然而,不均匀沉降导致的隐患正在严重威胁着该站的安全稳定运行。

丹巴变电站设备场地由于采用了大量的回填土,回填土平均厚度5.85 m,基础底标高-2.00 m,220 kV设备场地回填土厚度均大于10 m。由于回填土具有高含水量、高压缩性、极低强度、欠固结等特点^[6],特别是夏季汛期地基易发生不均匀沉降^[7]。

该站自2013年10月投运后不断沉降,导致引线被绷直,如图1所示;巡视道路高低不平且严重断



图1 引线被绷紧



图2 基础开裂

裂、设备基础开裂,如图2所示;设备倾斜、组合电气设备SF₆气室气体泄漏等一系列问题,该场区沉降差约18 mm,累计裂缝缝长600 mm,缝宽20 mm。

2 采用经纬仪的监测方法

2.1 经纬仪及其测量原理

2.1.1 经纬仪

经纬仪分为光学经纬仪和电子经纬仪。光学经纬仪采用光学度盘,借助光学放大和光学测微器读数的一种经纬仪;电子经纬仪与光学经纬仪的根本区别在于用于微处理机控制的电子测角系统代替光学读数系统,能自动显示测量数据,主要用于平面控制测量、精密工程测量^[7],下面重点介绍光学经纬仪。

光学经纬仪总体可分为3部分:基座、水平度盘和照准部,如图3所示。图中:1为制动螺旋;2为望远镜物镜;3为微动螺旋;4为水平制动螺旋;5为水平微动螺旋;7为竖盘水准管观察镜;8为竖盘水准管;9为瞄准器;10为物镜调焦环;11为目镜;12为度盘读数镜;14为光学对中环;17为垂直度盘;18为度盘照明镜;19为平盘水准管。

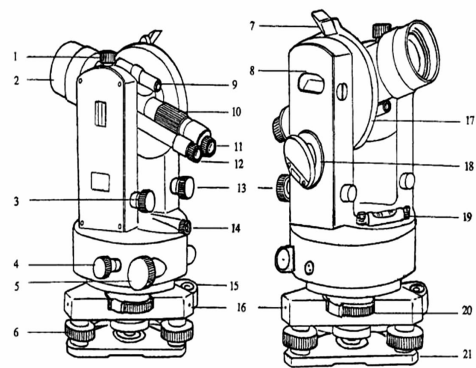


图3 光学经纬仪

2.1.2 水平角测量原理

相交于一点的两方向线在水平面上的垂直投影所形成的夹角,称为水平角。一般用 β 表示,角值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,如图4所示。

图4中,A、B、O是地面上任意3个点,OA和OB是两条方向线所夹的水平角,即为OA和OB垂直投影在水平面H上所构成的夹角 β 。可在O点的上方任意高度处,水平安置一个带有刻度的圆盘,圆盘中心在过O点的铅垂线上;设这两个铅垂面在刻度盘上截取的读数分别为a和b,则水平角 β 的

角值为

$$\beta = a - b \quad (1)$$

仪器上的望远镜不仅可以在水平面内转动,而且还能在竖直面内转动。经纬仪就是根据上述基本要求设计制造的测角仪器^[8-10]。

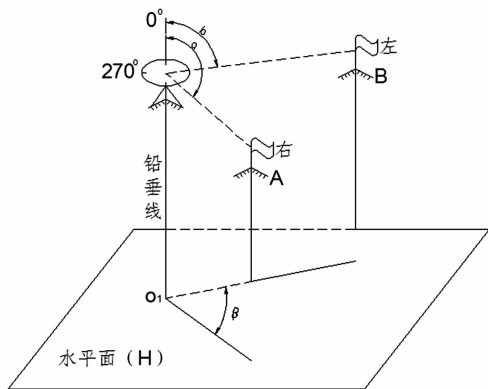


图4 水平角原理

2.1.3 垂直角测量原理

在同一铅垂面内,观测视线与水平线之间的夹角,称为垂直角,也称倾角,用 α 表示,其角值的范围为 $0^\circ \sim \pm 90^\circ$,如图 5 所示。

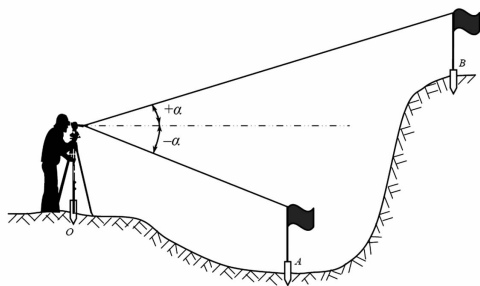


图 5 垂直角测量原理

图5中,望远镜瞄准目标的视线与水平线分别在竖直面盘上有对应读数,两读数之差即为垂直角的角值。视线在水平线的上方,垂直角为仰角,符号为正($+\alpha$);视线在水平线的下方,垂直角为俯角,符号为负($-\alpha$)。垂直角测量原理即度盘上两个方向的读数之差。

所以,测量垂直角时,只要瞄准目标读出竖盘读数,即可计算出垂直角。

2.2 采用经纬仪的监测方法探讨

针对丹巴变电站投运后地质沉降问题,选用光学经纬仪每月跟踪监测分析的方法,相对于其他测量手段,该方法简单、便捷,不需要专业测量人员参与,可以由驻站运维人员经过短时间的强化培训就可自行开展,对站址非常边远的藏区高海拔变电站

具有极大的应用价值。

基于地质沉降主要有竖直沉降和偏移,选取丹巴变电站 220 kV 场地 3 号独立避雷针为其中一个主要监测对象,选用经纬仪进行监测。

为了便于观察比较及减少监测误差,采用经纬仪选取同一设备不同高度观测点作为监测对象,如图6所示。

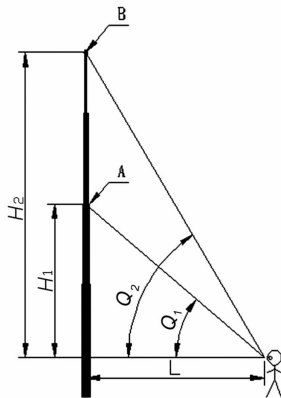


图 6 经纬仪测量原理

图 6 是采用光学经纬仪选取 220 kV 场地 3 号避雷针不同高度观测点 A、B 2 个点作为监测对象的原理图,观测线上的测试点设在固定地点,该点距离避雷针正下方的水平距离为 L ,A、B 点与测量点的相对高度分别为 H_1 、 H_2 ,根据垂直角原理,测得固定点与 A、B 点的夹角分别为 Q_1 、 Q_2 。因此,可以得出如下结论:测量角度 Q 随避雷针高度 H 的变化而相应发生改变,只需要通过经纬仪定时定点测量 Q 角就能反应出高度 H 的变化趋势。根据图 6,存在式(2):

$$H = L \cdot \tan Q \quad (2)$$

图7为对同一个设备通过测量2个点位判别沉降类型的原理图,通过经纬仪对2个监测点测量到的数据 Q_1 、 Q_2 ,将监测点前后2次的高度变化值 ΔH

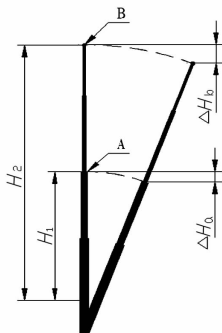


图 7 两点法判别沉降和偏移原理

表 1 采用经纬仪每月监测数据

Q	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次
Q_1	50°48′46″	50°48′28″	50°48′20″	50°48′18″	50°48′16″	50°47′42″
Q_2	65°1′28″	65°1′24″	65°1′18″	65°1′10″	65°1′4″	65°1′

表 2 计算后的相对高度单位:mm

H	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次
H_1	19 994. 889	19 992. 749	19 989. 812	19 986. 659	19 984. 348	19 982. 334
H_2	34 994. 876	34 992. 717	34 989. 778	34 986. 511	34 984. 152	34 982. 094

进行比较,其值就是 2 个点在该段监测时间内的相对沉降值,不仅可以反映出地基下沉趋势也可以反映出设备的偏移情况。

每个监测点连续二次测量的高度变化量为 ΔH 。根据图 7 可以得出以下结论:

1)以第 1 次监测到的 H_1 作为对照,得到相对沉降量为

$$\Delta H_n = H_1 - H_n \tag{3}$$

2)以每个监测点连续 2 次测量的高度变化量差值得到偏移量为

$$\Delta H' = \Delta H_b - \Delta H_a \tag{4}$$

$\Delta H' = 0$ 无偏移; $\Delta H' > 0$ 有偏移,且值越大偏移程度越大。

3 采用经纬仪的监测数据及结果分析

经过运维人员每月一次的定时跟踪测量,测得数据记录如表 1 所示。将表 1 数据代入式(2)中,计算出 3 号避雷针的相对高度如表 2 所示。将表 2 相邻 2 次的高度值进行比较,得到 ΔH 如表 3 所示。

表 3 相对高度变化量(沉降量) ΔH	单位:mm				
计算参数	T1	T2	T3	T4	T5
ΔH_a	2. 14	2. 937	3. 153	2. 311	2. 014
ΔH_b	2. 159	2. 939	3. 267	2. 359	2. 058
$\Delta H_a - \Delta H_b$	0. 019	0. 002	0. 114	0. 048	0. 044

通过 6 次监测分析结果见图 8 和图 9。

由图 8 可见,3 号避雷针场地沉降不断发展,既存在沉降,又存在偏移。随着沉降量的增加,偏移程度呈现无规律变化,但是考虑到测量误差的存在,横向偏移可忽略不计^[11]。可以认为,3 号避雷针基础主要是竖直沉降。

由图 9 可见,3 号避雷针场地沉降时快时慢,呈现无规律变化,但逐渐趋于稳定。

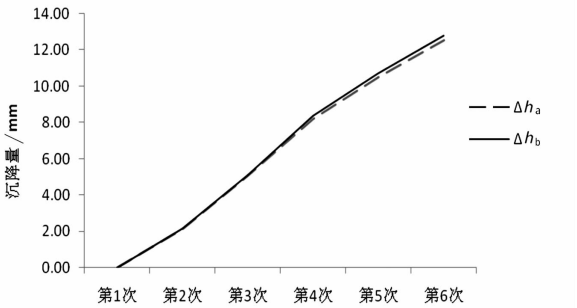


图 8 利用经纬仪测量变电站地基沉降量变化

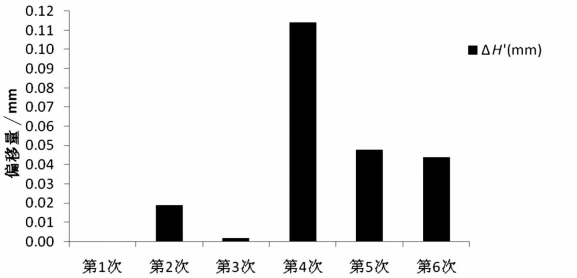


图 9 采用经纬仪测量变电站地基沉降偏移程度变化

4 沉降可能原因分析及管控措施

4.1 沉降可能原因分析

1)丹巴变电站站址区位于高山峡谷斜坡中下部缓坡台地上,属典型的高山峡谷地貌,地下以碎(块)石地层为主,局部分布有含碎石粘性土透镜体。主要基础持力层为碎(块)石土层,以中密为主,局部稍密或密实,主要成分为中等风化花岗岩,粒径变化较大。此地质特征易发生地质沉降现象^[12]。

2)回填土质量差,固结变形尚未完成。由于地质情况较为特殊,土质较差,基本为中等风化花岗岩,粒径变化较大,碎石粒径一般 20 ~ 170 mm,块石粒径一般 250 ~ 2000 mm,碎(块)石的含量可达 65% ~ 75%,缺少小颗粒。回填施工困难,回填密实度难以保证,影响了质量,造成后期沉降较大。

3)填方区高差较大。原始地面坡度约 30°,填土厚薄不均,约 5 ~ 10 m,填土自身有一个自重作用下的固结变形过程,填土厚的地段沉降变形大,填土薄的地段沉降变形小。回填土厚薄不均造成差异沉降,是造成回填土整体向西侧发生沉降变形及位移的重要原因。

4)沉降区域无排水措施,造成排水不畅,汛期的降雨又集中在沉降区域从而加剧不均匀沉降的进一步恶化^[7]。

综上所述,造成地基沉降的可能原因,既有内在原因(回填土厚薄不均、质量差,固结变形尚未完成等),又有外在原因(沉降区域排水效果差等),同时汛期大量降雨对内外两方面因素形成不利影响。总体而言,地质环境脆弱、回填材料松散破碎、回填区域薄厚不均,是促使其变形的内因和物质基础;而沉降区域排水效果较差,汛期的降雨又加剧了不均匀沉降的变化发展。

4.2 管控措施

1)采用新的技术手段来实时监测场地沉降情况,根据监测数据进一步制定相应的处理方案。

2)请专业测量人员定期到站对地基沉降进行定点测量,观察其变化趋势,分析运行风险,及时做好应对措施。

3)对驻站运维人员开展经纬仪使用技能的培训,驻站人员定期定点进行监测,分析其变化趋势,将结果汇报给专业人员,制定相应的处理方案。

5 结 语

变电站地质沉降是山区变电站存在的普遍问题,已建变电站地基下沉的情况时常发生,这对变电设备的安全生产带来巨大的安全隐患,严重的将造成重大经济损失。针对丹巴变电站投运后地质沉降观测问题所提出的采用经纬仪每月跟踪监测分析的方法,方法简单、便捷,不需要专业测量人员参与,可以由驻站运维人员经过简单的仪器培训就可自行开

展,该方法特别是对站址非常边远的藏区变电站具有极大的优势。

参考文献

[1] 王宏茹,郭剑黎,秦莉敏,等. 滨河变电站地基不均匀沉降的分析及治理[C]. 中国电机工程学会年会论文集,2011.

[2] 罗伶. 某变电站主变压器地基不均匀沉降分析与处理[J]. 广东水利电力职业技术学院学报,2004,2(2):24-27.

[3] 张计,胡胜刚,姜志全. 深圳机场中心变电站地基处理沉降监测分析[J]. 土木建筑,2012,26(5):32-34.

[4] 黄广军. 地基沉降的几种预测方法的可靠性分析[C]. 全国地基处理学术讨论会,2008.

[5] 黄广军. 沉降差法在恒载阶段的软土地基沉降预测中的应用[J]. 矿产勘查,2007,10(7):43-46.

[6] 朱进军,魏来. 填土场地变电站基础差异沉降分析与处理[J]. 山西建筑,2013,39(35):63-64.

[7] 刘陕南,吴林高. 工程降水引起的前期固结压力增长对软土工程性质影响的试验研究[J]. 工程勘察,1997(4):9-11.

[8] 曾贤华. 输电线路测量[M]. 北京:中国电力出版社,1992.

[9] 刘浩,练进根. GYR1 型电子式光学测风经纬仪的特点及使用常见错误纠正[C]. 2011 年底气象水文海洋仪器学术交流会,2011:217-221.

[10] 李岩,刘治稳,姚红亮. 利用经纬仪光学对中器安置仪器的探讨[C]. 中国电机工程学会青年学术会议,2010:292-296.

[11] 蒲鹏程,郭晓松,周召发. 经纬仪水平度传感器安装误差补偿方法[J]. 计算机测量与控制,2012,20(2):277-278.

[12] 杨峰. 经纬仪横轴误差对竖直角观测的影响[J]. 测绘工程,2011,20(4):67-69.

作者简介:
王运田(1987),助理工程师、技师,从事超高压变电站运行维护研究工作。
(收稿日期:2018-05-08)

欢迎订阅《四川电力技术》

功率晶闸管的热敏特性研究

董汉彬¹,贾志杰¹,王嘉易¹,宁 鑫¹,李泳龙¹,张明丽²,余 丰³
(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;
2. 东方电气(成都)工程设计咨询有限公司,四川 成都 611731;
3. 国网杭州供电公司,浙江 杭州 310000)

摘 要:功率晶闸管的诸多电气参数以及使用寿命都和其运行温度相关。研究功率晶闸管结温对提高其性能和可靠性,具有重要的实际意义。研究了功率晶闸管通态压降和结温之间的关系,并设计试验测得待测功率晶闸管的热敏曲线。在实际应用中,通过该曲线可将功率晶闸管的运行结温由相对容易测量的通态电压来表征,进而为运行中功率晶闸管的状态监测提供重要依据。
关键词:功率晶闸管;结温;换流阀
中图分类号:TN34 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2018)05 - 0054 - 02

Research on Thermal – sensitive Performance of Power Thyristor

Dong Hanbin¹,Jia Zhijie¹,Wang Jiayi¹, Ning Xin¹,Li Yonglong¹,Zhang Mingli²,Yu Feng³
(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. DongFang Electric (Chengdu) Engineering & Consulting Co. , Ltd. , Chengdu 611731, Sichuan, China;
3. State Grid Hangzhou Electric Power Supply Company, Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

Abstract: Many electrical parameters and lifetime of thyristor are related to its junction temperature. Research on junction temperature of thyristor will help a lot in its capability and reliability. The relationship between on – state voltage and junction temperature is studied. And some experiments are carried out to obtain the thermal – sensitive curve. According to this curve, the junction temperature can be measured with its on – state voltage. In addition, the proposed method will help to evaluate the condition of thyristor.
Key words: power thyristor; junction temperature; converter valve

0 引 言

随着脉冲功率技术的发展,晶闸管作为闭合开关在该领域也得到广泛应用。作为核心器件之一,晶闸管的状态也直接关系到系统的正常运行^[1-3]。微观研究和实际应用表明^[4],晶闸管的电气性能、使用寿命等参数均和其结温有着很大的关系。因此研究晶闸管各种工况下的结温不仅有助于优化改善晶闸管的性能,而且对提高其可靠性也具有重要的意义。

由于晶闸管不是理想开关,当其被触发导通后^[5-6],正向电流会在 PN 结中产生焦耳热,并且热量不会立即传递给封装中的钼片和铜基座,所以晶

闸管的外壳温度并不等于其结温。这就导致晶闸管的结温无法从外部测量。目前,分析和研究其结温的主要手段有热阻抗法、有限元分析法、扫描电镜、红外光谱法等^[2,4]。由于功率晶闸管在测量中存在封装复杂、额定电流高等实际情况,上述方法都存在一定的局限性。下面讨论一种通过功率晶闸管的热敏参数来反映结温的方法。

1 晶闸管的热敏特性

晶闸管是一种具有 3 个 PN 结的功率半导体器件^[7-8],而 PN 结的很多特性参数都对温度敏感,随着温度的变化而变化。因此可以通过测量 PN 结的某些特征参数和温度之间的关系来反映 PN 结的温

度,进而获得运行状态下晶闸管芯片的结温。

由文献可知,单个 PN 结的通态压降具有负温度特性,并且其通态压降随着 PN 结温度的升高在一定温度范围内呈现线性的下降。单个 PN 结的正向电流 I_f 和通态电压 U_f 具有式(1)所述的关系:

$$I_f = I_0(\exp(-\frac{qU_f}{kT}) - 1) \tag{1}$$

式中: k 为玻尔兹曼常数, $1.380\ 650\ 5 \times 10^{-23}$ J/K; q 为电子的电荷量, $1.602\ 192 \times 10^{-19}$ C。 T 为热力学温度; U_f 为通态压降; I_0 为 PN 结的反向饱和电流。 I_0 的表达式为

$$I_0 = AT^3 \exp(-\frac{qU_{g0}}{kT}) \tag{2}$$

式中: A 为一个与温度无关的常数; U_{g0} 为半导体材料的禁带宽度。

将式(2)代入式(1),两边同时取对数整理可得式(3)。

$$U_f = (\frac{k}{q} \ln \frac{I_f}{A}) T + U_{g0} - \frac{3k}{q} T \ln T = U_1 + U_{nl} \tag{3}$$

式中: $U_1 = (\frac{k}{q} \ln \frac{I_f}{A}) T + U_{g0}$; $U_{nl} = -\frac{3k}{q} T \ln T$ 。

式(3)描述了 PN 结的通态压降、正向电流、结温三者之间的关系。可以看出,当 I_f 为恒流时,通态压降只与 PN 结的温度相关。易知当 $T=0$ 和 $T=1$ 时, $U_{nl}=0$ 。对 U_{nl} 表达式求导可得式(4)。

$$U_{nl}' = (-\frac{3k}{q} T \ln T)' = -\frac{3k}{q} (1 + \ln T) \tag{4}$$

易知当 $T=1/e$ 时, U_{nl} 存在一个极值点且为极大值。

U_{nl} 与 T 的关系如图 1 所示,在图中的高温区和低温区, U_{nl} 随 T 的变化的非线性很强;而在中温区两者则趋向于线性关系。

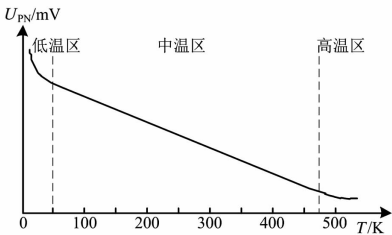


图 1 硅 PN 结的典型 $U-T$ 特性曲线

实际应用中,硅半导体元件的工作极限温度为 473 K,在图 1 位于中温区,因此可以利用式(3)研究其特性。

2 热敏特性的测试

设计并搭建了如图 2 所示的实验平台对功率晶闸管的热敏特性进行测试。待测功率晶闸管为某型 5 in 冰球型封装功率晶闸管,其额定电流为 2200 A。测试电流 I_f 在取值时既要保证功率晶闸管能够完全开通,又要尽量减少其自身导致的附加发热。根据文献[6]可知,当 $I_f=20$ A 时,可认为功率晶闸管芯片已经充分导通且远小于额定电流,因此,平台中采用了一台 20 A 的恒流源提供式中的 I_f 。

实验时,用烘箱将待测功率晶闸管逐级加热至不同的目标温度,经过足够长时间达到热平衡后触发功率晶闸管使其导通,测量其在 20 A 恒定电流下(热敏电流)的通态压降 U_f (由图 2 中 a、b 端点引出)。将获得的通态压降与对应温度关系绘制成曲线,即热敏特性校准曲线(简称热敏曲线)。

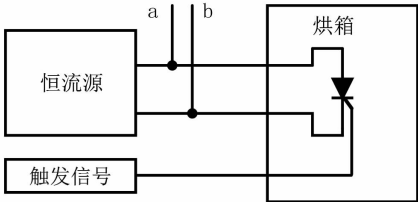


图 2 实验平台示意

3 数据分析

图 3 为本次实验获得的某型功率晶闸管的热敏曲线。

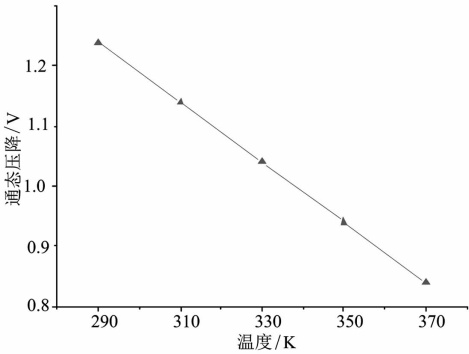


图 3 待测功率晶闸管在 20 A 时的热敏曲线

通过图 3 可知,该区间内热敏曲线的线性度较好,拟合出式(5)。

(下转第 85 页)

变压器励磁涌流的抑制方法综述

张文韬¹,王渝红¹,丁理杰²,史华勃²,宋雨妍¹,李天泽¹

(1. 四川大学电气信息学院,四川 成都 610065;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘要:变压器作为电力系统中的关键设备,其运行状态能否正确、稳定会影响到电网供电的可靠性。而变压器的励磁涌流不仅容易影响到变压器差动保护的正确率,严重时还会对电力系统的其他设备造成严重的电气污染。这里指出了励磁涌流产生的原因以及影响,并对当前抑制励磁涌流的措施,如一次侧串电阻法、电压侧并联电容法、选相合闸法等方法 的原理进行了综述,从经济和技术上对各方法的优缺点进行了分析,并对这些方法在国内外的实际应用进行了介绍,展望了今后励磁涌流的抑制方法研究的发展趋势及研究方向。

关键词:变压器;励磁涌流;抑制方法

中图分类号:TM933 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)05-0056-07

Review of Attenuation Methods for Transformer Inrush Current

Zhang Wentao¹, Wang Yuhong¹, Ding Lijie², Shi Huabo², Song Yuyan¹, Li Tianze¹

(1. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University Chengdu 610065, Sichuan, Cjoam;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:As the key equipment in power system, whether the operation status of transformer is correct or stable will affect the reliability of power supply. The inrush current of transformer can not only affect the correct rate of differential protection of transformer, but also cause serious electrical pollution to other equipment of power system. The occurring causes and influence of inrush current are pointed out. The current measures for the suppression of inrush current are reviewed, such as series resistance method in primary side, shunt capacitance method in voltage side and phase selection method. The advantages and disadvantages of each method are analyzed from the economic and technical aspects, the practical application of these methods at home and abroad is introduced, and the developing trend and research direction of the future attenuation methods for inrush current are prospected.

Key words:transformer; inrush current;attenuation method

0 引言

变压器是电力系统中最重要 的设备之一,变压器的稳定运行与否,与电力系统的稳定运行密切相关。变压器的一次侧在空载合闸或者外部故障切除后恢复时会产生极大的励磁涌流,其值可能达到变压器额定电流的 6~8 倍,而正常情况下励磁电流应该仅占额定电流的 2%~5%^[1]。过大的励磁涌流不仅会导致变压器的差动保护装置误动作,导致电网电压骤降或骤升,严重时可能会造成电网大面积停电。变压器也会因为励磁涌流导致内部结构受到

损害,同时造成变压器变形,损害变压器的绝缘,减少变压器的使用寿命。如今针对变压器的励磁涌流主要都采取以识别为主的方法来保证差动保护不发生误动^[2-6],但变压器的励磁涌流并没有被去除,励磁涌流中的直流分量和高次谐波的存在会导致电力系统的供电质量下降,严重时可能还会导致电压暂降以及过电压的问题。近年来随着高压直流输电系统的不断发展,交流系统与直流系统之间的联系越来越紧密,在直流近区中交流系统中产生的励磁涌流会对直流系统造成影响。因此,为了有效地抑制励磁涌流的大小,以便减小励磁涌流对变压器及整个系统的危害,抑制励磁涌流成为了国内外学者研

究的重点问题。

下面将对各文献中提出的励磁涌流的抑制方法进行归纳总结,分别对其原理及优缺点进行分析,并结合变压器的实际情况对将来励磁涌流的抑制方案进行了展望。

1 励磁涌流的产生原因及其影响

变压器在正常运行时,励磁电流的值最大仅为额定电流的2%~5%。而在发生外部故障时,电压降低,励磁电流也将随之减小。因此变压器正常运行或发生外部故障时,都不会出现励磁涌流。

但当变压器空载投入或将外部故障切除后变压器重新投入运行时,由于电压的突然变化,磁场急剧增大,导致变压器内部的铁心饱和。饱和磁通的大小取决于铁心材料的磁导率、磁路长度及截面等因素,铁心磁通饱和导致励磁电感减小,励磁电流激增为励磁涌流。设变压器的高压侧电压为 U , U_m 为变压器正常运行时的电压最大值。变压器稳态运行情况下设绕组端电压为

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

忽略变压器漏抗和绕组电阻,则用标么值表示的电压 U 与磁通 Φ 之间的关系为

$$U(t) = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

式中: N 为变压器匝数; Φ 为铁心磁通。设 $N=1$,当变压器空载合闸时,由电压 U 与磁通 Φ 之间的微分方程求解可得

$$\Phi = \int U(t) dt = -\Phi_m \cos(\omega t + \theta) + C \quad (3)$$

$$\Phi_m = \frac{U_m}{\omega} \quad (4)$$

式中: θ 为变压器投入时刻的初相角; ω 为角速度; C 为积分常数; Φ_m 是变压器稳态工作时的磁通幅值。由于铁心中的磁通不能骤变,设变压器空载投入瞬间($t=0$)铁心的剩磁为 Φ_r ,则积分常数

$$C = \Phi_r + \Phi_m \cos\theta \quad (5)$$

于是,空载合闸时变压器铁心中的磁通为

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \theta) + \Phi_m \cos\theta + \Phi_r \quad (6)$$

式中:第1项为稳态磁通;后两项为暂态磁通,在计及变压器损耗的情况下,暂态磁通将随着时间的衰减而衰减。假设后两项参数同为正或同为负,则半个周期后铁心磁通会达到 $2\Phi_m \cos\theta + \Phi_r$ 。变压器空

载投入时,合闸初相角 θ 决定了磁通量的大小。在电压过零点($\theta=0^\circ$)空载合闸半个周期后将产生最大磁通 $2\Phi_m + \Phi_r$,远远大于变压器的饱和磁通 Φ_s ^[1]。

在变压器铁心饱和后,励磁电流将急剧增大,最大可能达到额定电流的6~8倍。励磁涌流具有以下特点:

1)励磁涌流具有非对称性,含有大量的非周期分量,其波形会比正常情况下的励磁电流更为接近时间轴的一侧。

2)励磁涌流的波形存在间断,有明显的波形间断角。波形间断角随着涌流的大小而变化,铁心饱和程度越高,涌流越大,间断角也就越大。

3)励磁涌流中含有大量以偶次谐波为主的谐波分量,其中二次谐波的含量最多。

目前针对励磁涌流的各种抑制方法主要可以分为两大类。一类是通过外接设备或者改变变压器内部结构等方法来进行抑制。这类方法主要有变压器一次侧串电阻、改变变压器绕组接法、变压器低压侧接电容、采用电力电子器件抑制励磁涌流法等。另一类主要是通过改变变压器内部的相应参数来达到控制励磁涌流的目的。这类方法主要包括预充磁法、选相合闸法、消除剩磁法等。近年来,随着研究领域的扩大以及研究层次的深入,国内外学者将两类方法结合起来,又提出了很多新的抑制励磁涌流的方法。这些方法的提出,为未来解决励磁涌流的抑制这一课题提供了新的思路。下面对以上方法进行综述。

2 外接设备或改变内部结构的抑制方法

2.1 变压器一次侧串电阻

该方法原理是在变压器空载合闸时在变压器高压侧绕组串联一个合闸电阻。这样在励磁涌流产生时,励磁涌流会因为该合闸电阻的影响而被减弱。当变压器进入稳态运行时候,再利用旁路开关将此合闸电阻切除掉。选择合适的合闸电阻阻值还可以加快励磁涌流的衰减速度。

文献[7]提出了一种利用时间继电器与串联合闸电阻结合的装置,利用时间继电器来控制变压器主回路和串联合闸电阻的投切时间。投入实际应用后表明效果良好。文献[8]结合了合闸电阻的等效

电路,通过理论分析证明了串联合闸电阻抑制励磁涌流的可行性,并在 ± 800 kV的换流变压器上加装了不同阻值的电阻进行了对比研究,可看出合闸电阻的大小与励磁涌流不是线性关系,在实际应用中应进行优化。文献[9]中在变压器一次侧主断路器两端附加了并联电阻和辅助开关,变压器空载合闸时令并联电路先接入电路,待一段时间后,主断路器合上,短路并联电阻并断开辅助开关,完成变压器的合闸过程。利用电阻的阻尼作用,使得励磁涌流的衰减速度变得更快。同时通过对多组数据的仿真,综合考虑电阻的能耗以及抑制效果,得出针对于该仿真模型的最优合闸电阻值。

该类方法的操作比较复杂,而且增加了设备的投资。尤其对于大容量的变压器,其阻值也相应需要很大,并且还可能对大容量变压器的高压侧的功率送出造成一定的影响。因此该方法一般仅适用于小容量的变压器空载合闸时使用。

2.2 改变变压器绕组接法

铁心的磁导率在铁心饱和时会近似等于真空的磁导率。变压器的一次绕组在变压器产生励磁涌流时可以看作是一个不包含铁心的空心线圈。由于励磁电感随着截断面积的增大而增大,如果能够通过改变变压器绕组分布,改变其截断面积,这样就能通过增大励磁电感来抑制励磁涌流。

文献[10]以3层式的S-P-S结构和4层式的S-P-S-P结构的变压器为例进行分析,从机理上叙述了如何通过改变绕组的方式来抑制励磁涌流。文献[11]通过对多组S-P-S结构的变压器进行实验,验证了改变绕组方法抑制励磁涌流的可行性。文献[12]提出了一种新型的改变绕组的方法,该方法利用了扇形绕组的设计,通过提高变压器的饱和和电感值来达到抑制励磁涌流的目的,不需要增设其他元件。该文通过仿真发现扇形绕组接法应用在大型变压器上时对励磁涌流有较好的抑制效果。文献[13]提出了一种改变一、二次绕组分布,通过增加合闸过程中变压器的自感来对励磁涌流进行抑制。

改变变压器绕组接法的缺点在于需要改变变压器的内部结构,可能会影响到变压器的绝缘特性,而且对已投运的变压器,改造的成本过高。

2.3 变压器低压侧并联电容器

变压器产生励磁涌流的主要原因是铁心饱和,

如果能采取措施令变压器绕组内的磁通被限制在饱和值以下,励磁涌流相应地也就会被抑制。基于这种思想,在变压器的低压侧并联电容器,通过电容器在低压侧产生与高压侧磁性相反的磁通,降低铁心饱和度,使得抑制励磁涌流得以实现。若取用合适的电容参数与励磁电感产生谐振,励磁阻抗的值会在额定频率下达到无穷大,在这种情况下可以完美地抑制励磁涌流。

文献[14-15]简单介绍了此方法的原理,并且通过荷兰PGEM公司在1992年的实际试验,提出了并联电容器取值对励磁涌流抑制效果的影响问题。文献[16]通过对变压器等效电路的分析,提出先利用等效瞬时电感求取瞬时励磁电感,再用求得的励磁电感来确定用于抑制励磁涌流的电容值。并通过仿真验证了变压器低压侧并联电容器抑制励磁涌流的可行性。但计算出的并联电容值可能存在计算误差而不能完美地抑制励磁涌流。文献[10]为了解决计算误差的问题,在变压器低压侧并联电容器的基础上,将选相合闸技术与之结合,通过仿真计算发现在两种抑制方法结合的情况下,较之单独使用其中的某一种方法,结合使用后励磁涌流的抑制效果较好。

低压侧并联电容器的主要缺点在于难以确定合适的电容值,不同电容值的选取,会导致励磁涌流的变化很大。因此单独使用变压器电压侧并联电容时必须要了解变压器的励磁特性。一般考虑将此方法与其他几种抑制励磁涌流的方法结合使用,以达到较好的抑制效果。

2.4 利用电力电子器件抑制励磁涌流

近年来电力电子技术发展迅速,其快速发展对电力系统的运行和控制都带来了巨大的影响。因此有学者将电力电子技术运用在抑制励磁涌流方面,也取得了较好的效果。

文献[17]讨论了分别利用直流电抗器和串联联结的电压源PWM转换器来限制励磁涌流。直流电抗器应用在单相变压器上后几乎不产生励磁涌流,在三相变压器上励磁涌流会被很好地抑制。单相和三相变压器在采用PWM转换器后,励磁涌流均不会产生。文献[18]设计了一种基于二阶欠阻尼电路实现的涌流抑制器。此涌流抑制器可根据特定时间常数变化幅值的电压施加在变压器的第3绕组上,有效地抑制在暂态过程中产生的励磁涌流。

充电完成后,涌流抑制器退出运行,不会对电力系统造成影响。文献[19]提出将超导故障限流器(superconducting fault current limiter, SFCL)应用于励磁涌流的抑制上。将限流电阻(current limiting resistance, CLR)与超导故障限流器(SFCL)结合在一起使用,根据变压器的具体数据,通过仿真计算得出最合适的阻值,仿真结果验证了此方法在抑制励磁涌流中的应用有效性。

现阶段由于成本以及控制复杂的原因,电力电子器件抑制励磁涌流的各种方法还未大规模地应用于实际工程上。但是随着电力电子技术的不断发展,新的应用在励磁涌流的抑制上可能会出现。

3 改变变压器的相应参数的抑制方法

3.1 变压器预充磁

在交流系统中,电压总是超前磁通 90° 相位角。合闸的最优情况是在当电压相位角为最大时,此时合闸磁通的瞬间值也为 0,这种情况下变压器就不会产生励磁涌流。在其他时刻合闸时,磁通值不为 0,由于铁心中的磁通不能突变,因此铁心中就会产生式(6)中的非周期分量,非周期分量越大,铁心越容易饱和,铁心饱和就会产生极大的励磁涌流。如果考虑在变压器合闸前对变压器的原边进行预充磁,通过预充磁产生的磁通令合闸时的磁通不是突变的状态,可以减小非周期分量的幅值,同时也就达到了抑制励磁涌流的目的。

文献[20]从励磁涌流的产生原理出发,分析了预充磁技术的实现原理。文献[21]对变压器实例进行预充磁操作,通过工程实例验证了预充磁能够有效地抑制励磁涌流。文献[22]研究了串接小容量变压器预充磁抑制励磁涌流可行性,并结合船舶电力系统的工程实际,进行了建模仿真和动模系统物理试验验证。文献[23]设计了一种由直流电压源、开关、电容、二极管、熔丝和双熔点断路器组成的预充磁装置。针对不同剩磁的情况做了仿真实验,结合仿真结果与变压器的极限磁滞回线,确立了预充磁装置的充磁目标值,最后确立预充磁装备断路器的关断角。文献[24]对船用变压器的两种预充磁技术进行了分析研究。其中串接电阻预充磁方法对励磁涌流的抑制效果较差,串联小容量变压器预充磁的效果较好。但前者实现方便,成本较低;后者

虽然实用性较高,但是不能单独使用。

预充磁技术单独使用虽然也能够一定程度上抑制励磁涌流,但实际工程中为了达到更好的效果,一般考虑将预充磁技术与选项合闸技术以及剩磁消除技术等方法结合起来一起使用,以达到更好的抑制效果。预充磁技术在使用时也应当考虑到实现难度,做到经济性与实用性并存。

3.2 选相合闸技术

选相合闸技术最早提出于 20 世纪 70 年代,主要用于降低操作过电压及合闸涌流。近年来随着国内外学者的不断深入研究,此技术在空载变压器合闸上也得到了应用。选相合闸技术的原理是通过控制断路器的投切时间,以达到减少式(6)中暂态分量的目的,从而抑制励磁涌流。文献[10]与文献[25-27]对选项合闸的原理进行了分析,并提出了 3 种常用的针对三相变压器的选项合闸策略。

1) 快速合闸策略:此策略下,假设 A 相剩磁 $\Phi_A = 0$, B 相剩磁 $\Phi_B = -0.8\Phi_m < 0$, C 相剩磁 $\Phi_C = 0.8\Phi_m > 0$ 。当电压为峰值时令 A 相合闸,并在 A 相合闸后 $1/4$ 个工频周期后将 B 和 C 两相进行合闸,这样就能防止 B 和 C 两相铁心中的磁通饱和,达到抑制励磁涌流的目的。

2) 延迟合闸策略:在某一项剩磁为已知的情况下可以采用这种方法。假定 A 相剩磁为已知,令 A 相在其电压峰值时刻(此时合闸不会产生暂态磁通)合闸, B 与 C 两相在经过 $2 \sim 3$ 个工频周期后合闸。设 B、C 两相中的磁通情况为 $\Phi_B > \Phi_C$, 当 B 相感应磁通进入饱和区后, C 相的感应磁通还未饱和。在此暂态过程中应有: $L_B \gg L_C$, 且 B 相的感应电动势也远远大于 C 相的感应电动势。B、C 两相的磁通均会逐渐增加,但由于 C 相的增加速度大于 B 相的增加速度,最后两相铁心内部的剩磁会达到平衡状态,并且相位超前 A 相 180° , 消除剩磁的影响。

3) 同步合闸策略:此方法需要控制断路器,令三相中任意一相(设为 A 相)剩磁等于 0, 另外两相(设为 B、C 两相)剩磁不等于 0 且一相为正、另一相为负,并且剩磁幅度不能太小。此时可以令三相同时选择在 A 相的最佳相位合闸点处合闸,但此方法的实现前提条件较为严苛。

文献[28]提出了一种不考虑剩磁的选相合闸方法。利用 SF₆ 断路器对三相变压器绕组进行控制,设置每相 60° 的机械延时相角,以 B—C—A 的顺

序每隔 1 ms 分相合闸能最后结果显示能有效抑制励磁涌流。该方法已经在匈牙利的两个变电站中进行了实际应用且效果良好。文献[29]利用 MATLAB 仿真软件中的 PSB(power system block)建立了三相变压器空载合闸的仿真模型,并针对无剩磁和有剩磁两种情况下的选相合闸技术进行了仿真分析。并提出将 DSP 技术应用到选相合闸技术的控制系统中的展望。文献[9]对合闸涌流以及和应涌流两种情况下应用选相合闸技术后的抑制效果进行了分析,最后结合工程实例,得到以剩磁检测装置辅助于选相合闸装置后,抑制效果会更好的结论。文献[30]分析了针对直流系统中的换流变压器,提出了一种新的控制逻辑来控制选相合闸技术对换流变压器励磁涌流的抑制。文献[31]详细分析了通过电压积分求取剩磁的方法与剩磁的大小和极性对抑制励磁涌流的影响。文献[32]在分析选相合闸技术原理的基础上,结合现有的剩磁计算方法,详细分析了快速合闸策略和延迟合闸策略。但是现阶段的剩磁一般都是通过电压积分得到,在某些情况下不能精确地得出剩磁的值,因此会影响到抑制效果。文献[33]从铁心的磁学特性角度入手分析了选相合闸技术的原理,并指出抑制励磁涌流仅需式(6)中的两项暂态分量——偏磁与剩磁的极性相反即可。只要偏磁与剩磁不叠加,磁路就不会饱和。此方法大大减小了对选相合闸操作的精度要求。文献[34]通过建立变压器空载合闸时的详细数学模型,分析了变压器分闸时电流相位角对于剩磁量的影响,以数学关系式的形式展现了分闸时的电流相位角和励磁电流相位角的联系。通过分析这些因素之间的联系,再应用于选相合闸技术上。文献[35]在分析选相合闸技术的原理基础上,设计了一种硬件系统以 DSP 为基础并且具有采样、控制、通信功能的永磁真空断路器。通过 C 语言进行编程,使之能够在空载变压器进行合闸时对选相合闸操作进行控制。应用于实例后发现该断路器有较好的抑制效果。文献[36]将晶闸管技术应用于选相合闸技术,提高了断路器的精度。文献[37]对近年来提出的各种选相合闸方法进行了详细的仿真分析,提出了选相合闸技术中断路器的误差应当不超过 0.5 ms。并提出考虑应用 DSP 技术或者模糊 PID 或者神经元 PID 等算法进行闭环控制,对断路器的误差时间进行进一步控制。文献[38]通过四川某电网空充

主变压器的实例,分析了励磁涌流带来的谐波危害,并提出在空载主变压器合闸前,先利用测磁器对主变压器剩磁进行测量,判断出剩磁最大相的磁性,同时利用选相合闸技术与一次侧串联合闸电阻的方法来抑制励磁涌流。并在最后提出若无法测试剩磁方向,可以考虑先对主变压器进行消磁操作,再应用该综合策略。文献[39]根据剩磁量的不同情况提出了 4 种选相合闸策略,分析了其抑制涌流的效果。文献[40]针对三相中性点不接地的变压器,提出了一种测量其剩磁量的方法并通过测得的剩磁量进行选相合闸操作。文献[41]针对电压降低情况下的变压器,通过磁通量函数求得变压器中的剩磁量,确定选相合闸的最佳时刻。虽然该文指出其方法不能完全抑制励磁涌流,但是此方法是低电压情况下性价比最高的。文献[42]考虑通过控制断路器来对剩磁进行控制,将剩磁从未知量变为已知量,针对已知的剩磁量再调整选相合闸装置的参数,以有效地抑制励磁涌流。

选相合闸技术是目前应用最广泛的抑制励磁涌流的技术之一。较之其他几种抑制技术,它的抑制效果较好且不会对电力系统造成负面影响。但是此方法不可能完全实现三相同相位合闸,所以不能彻底消除励磁涌流,且实现难度较大,需要考虑的因素也较多,其中最关键的影响因素是变压器中的剩磁。如何改善选相合闸技术,使其能更经济地应用于实例成为了今后研究的重点方向。

3.3 削弱变压器剩磁

剩磁是影响励磁涌流的重要因素之一,在选相合闸技术中,能否得知准确的剩磁值是设置合闸时间的关键。如今尚未有一种能够精确测量剩磁值的方法。如果在变压器空载合闸前能够消除或减弱剩磁,即使不测量,也能使得变压器空载合闸时产生励磁涌流的概率大大降低。文献[43]对大容量变压器在直流测试后产生的剩磁进行了消除试验,并提出了直流消磁和交流消磁两种方法。其中直流方法研发更为成熟,并已广泛应用于实际生产中。文献[44]分析了剩磁对于变压器投运的危害,并联系实际分析阐述了上述两种消磁方法的效果。文献[45]从铁心本身的结构性质出发,提出了一种基于剩磁预测的消磁方法。文献[46]等利用低功率超低频电压源、电力电子开关和一个简单的控制器设计了一种减小剩磁的元件,此元件能够产生单相的

矩形电压波形来对剩磁进行削弱。文献[47]提出了一种通过测量变压器空载时某相的电压来估算剩磁的方法,并通过控制变压器的断电时刻使得变压器中的剩磁减小到最低水平。最后结合工程实际,将该方法与变压器绕组接法、断路器的特性及选相合闸技术结合使用来对励磁涌流进行抑制。

消除剩磁可以减小磁通的暂态分量,使铁心不容易达到饱和状态。消除剩磁后,可以配合前面提到的其他几种方法进一步抑制励磁涌流,减小励磁涌流对变压器以及电力系统的危害。

4 结 语

目前励磁涌流的抑制方法已有许多较为成熟的方法,且近年来国内外学者又在已有的抑制方法的基础上进行改进。例如文献[48-49]提出了一种基于控制合闸电压幅值抑制励磁涌流的思想。但是由于影响励磁涌流的因素较多,现有的方法没有一种能够完美地抑制励磁涌流,很多方法也仅仅停留在实验阶段。不能大规模地应用于工程实际。因此针对此问题还需要进一步研究与完善。建议实际生产过程在选择方法时,可以同时采用不同原理的消磁技术,以达到抑制励磁涌流的目的。

参考文献

- [1] 贺家李. 电力系统继电保护原理(第四版)[M]. 北京:中国电力出版社, 2010:266-270.
- [2] 李晓华, 张冬怡, 吴立珠, 等. 换流变压器励磁涌流的特殊性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(12):3869-3875.
- [3] 姚东晓, 张凯, 贺要峰, 等. 变压器多特征励磁涌流识别方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13):149-154.
- [4] 凌光, 苏斌. 一种基于差流波形特征的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6):19-24.
- [5] 葛宝明, 王祥珩, 苏鹏声, 等. 电力变压器的励磁涌流判据及其发展方向[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22):1-5.
- [6] 张小钊, 兰生. 变压器励磁涌流的识别方法综述[J]. 电气开关, 2016(3):1-6.
- [7] 王景丹, 龚晓伟, 牛高远, 等. 变压器频繁空载投入的励磁涌流抑制技术研究[J]. 自动化技术与应用, 2017, 36(10):92-95.
- [8] 余世峰, 聂定珍, 项冰. 特高压直流换流变压器励磁涌流及其抑制[J]. 电力建设, 2014, 35(10):26-30.
- [9] 滕文涛. 大容量交流变压器励磁涌流及其抑制措施研究[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
- [10] 张严. 变压器励磁涌流识别和抑制技术的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2014.
- [11] Cheng C K, Liang T J, Chen J F, et al. Novel Approach to Reducing the Inrush Current of a Power Transformer [J]. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 2004, 151(3):289-295.
- [12] Saeed J, Dogan R, Koban B, et al. Reduction of Inrush Currents in Toroidal Transformers by Sector Winding Design[J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2016, 31(10):6776-6780.
- [13] Cheng C K, Liang T J, Chen J F, et al. Novel Approach to Reducing the Inrush Current of Power Transformer [J]. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 2004, 151(3):289-295.
- [14] 李琥, 段乃欣, 周海洋, 等. 两种削弱励磁涌流的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2003, 31(4):35-37.
- [15] 陈丽, 姜国涛. 几种变压器励磁涌流抑制方法的性能分析[J]. 变压器, 2010, 47(6):37-41.
- [16] 张荣海. 变压器励磁涌流的识别与抑制技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- [17] 邹必昌. 变压器空载投入时励磁涌流抑制新方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(3):113-116.
- [18] 何越, 林湘宁, 黄景光. 一种直接消除变压器合闸励磁涌流的方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11):141-149.
- [19] Seo HC, Kim CH, Rhee SB, et al. Superconducting Fault Current Limiter Application for Reduction of the Transformer Inrush Current: A Decision Scheme of the Optimal Insertion Resistance[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(4):2255-226.
- [20] 陈瑞. 预充磁在抑制变压器空载合闸励磁涌流中的作用[J]. 船电技术, 2009, 29(1):24-26.
- [21] 李占元, 张伟红, 杜秀红. 预充磁绕组在抑制变压器空载合闸励磁涌流中的应用实例[J]. 变压器, 2013, 50(3):56-58.
- [22] 钱伟康, 陈婷婷, 王良秀, 等. 船用变压器励磁涌流及预充磁技术研究[J]. 船舶工程, 2014, 36(6):56-59.
- [23] 何小庆, 刘淑萍, 李攀宏, 等. 一种消除单相变压器励磁涌流的预充磁策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17):120-124.
- [24] 张琦兵, 邵能灵, 王鹏, 等. 船舶变压器预充磁分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18):145-

- 149.
- [25] Brunke J H, Fr Hlich K J. Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching – Part I: Theoretical Considerations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 276 – 280.
- [26] Brunke J H, Fr Hlich K J. Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching – Part II: Application and performance Considerations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 281 – 285.
- [27] Abdulsalam S G, Xu W. A Sequential Phase Energization Method for Transformer Inrush Current Reduction – transient Performance and Practical Considerations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2007 22(1): 208 – 216.
- [28] Laszlo P, Gyorgy B, Gabor B, et al. Reducing the Magnetizing Inrush Current by Means of Controlled Energization and De – energization of Large Power Transformers [C]. International Conference on Powersystem Transients, New Orleans, 2003.
- [29] 唐博, 彭安金, 王高丰, 等. 采用选相位关合技术消除变压器空载合闸的励磁涌流[J]. 电器开关, 2007(3): 22 – 25.
- [30] 杨通赞, 李晓华, 戴扬宇, 等. 换流变励磁涌流特性分析及其抑制[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(1): 64 – 70.
- [31] 李伟, 黄金, 方春恩, 等. 基于相控开关技术的空载变压器励磁涌流抑制研究[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 9 – 13.
- [32] 沃建栋, 郑涛, 万磊, 等. 基于合闸控制策略的变压器励磁涌流抑制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 32 – 36.
- [33] 乌云高娃, 刘涤尘, 叶念国. 基于变压器励磁涌流成因的涌流抑制策略[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(6): 83 – 86.
- [34] 顾春阳, 王爱元, 李健, 等. 一种有效抑制变压器空载合闸励磁涌流的方法[J]. 变压器, 2015, 52(11): 33 – 36.
- [35] 倪海妙. 基于选相控制的空载变压器关合励磁涌流抑制方法的研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [36] 张铁军, 陈颖, 陈刚, 等. 基于晶闸管开关的变压器励磁涌流抑制方法[J]. 电力电子技术, 2011, 45(4): 95 – 97.
- [37] 范兴明, 葛琳, 张鑫, 等. 基于选相合闸技术的变压器励磁涌流的仿真分析[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 54 – 59.
- [38] 魏巍, 向天堂, 丁理杰, 等. 励磁涌流引发的谐波过电压机理分析以及抑制措施研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(24): 24 – 32.
- [39] Cano – Gonzalez R, Bachiller – Soler A, Rosendo – Macias JA, et al. Controlled Switching Strategies for Transformer Inrush Current Reduction: A Comparative Study [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 145(4): 12 – 18.
- [40] Cano – Gonzalez R, Bachiller – Soler A, Rosendo – Macias JA, et al. Inrush Current Mitigation in Three – phase Transformers with Isolated Neutral [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 121(4): 14 – 19.
- [41] Cano – Gonzalez R, Bachiller – Soler A, Rosendo – Macias JA, et al. Optimal Gang – operated Switching for Transformer Inrush Current Reduction[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 131(2): 80 – 86.
- [42] Fang SH, Ni HM, Lin HY, et al. A Novel Strategy for Reducing Inrush Current of Three – phase Transformer Considering Residual Flux[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4442 – 4451.
- [43] 康真, 张梅. 大容量变压器直阻测试产生的剩磁危害及消除[J]. 宁夏电力, 2014(5): 18 – 22.
- [44] 刘连升, 阴丽美, 李宁, 等. 剩磁对大型电力变压器的危害及消除方法[J]. 变压器, 2016, 53(5): 56 – 59.
- [45] Ge W, Wang Y. Calculation and Elimination of the Residual Flux in the Closed Magnetic Core [C]. IEEE International Magnetics Conference (Intermag), Beijing, 2015.
- [46] Kovan B, de Leon F, Czarkowski D, et al. Mitigation of Inrush Currents in Network Transformers by Reducing the Residual Flux with an Ultra – low – frequency Power Source[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1563 – 1570.
- [47] Parikh U, Bhalja BR. Inrush Current Mitigation in Three – phase Transformers with Isolated Neutral [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 76(5): 156 – 164.
- [48] 丛伟, 王伟旭, 肖静, 等. 控制合闸电压幅值的变压器励磁涌流抑制方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 159 – 165.
- [49] 王伟旭. 控制合闸电压幅值的变压器空载合闸励磁涌流抑制方案研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.

作者简介:

张文韬(1994), 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制;

王渝红(1971), 教授、硕士生导师, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制、新能源并网方式等。

(收稿日期: 2018 – 05 – 10)

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

(国网四川省电力公司检修公司,四川 成都 610041)

摘要:运用 ANSYS Maxwell 和 EMTP 软件联合仿真,将“场”和“路”相结合的方法用于计算 500 kV MOA 带电测量相间干扰问题,并通过实际运行数据加以验证,为 MOA 在线监测减小相间干扰提供了理论依据和切实可行的办法。

关键词:金属氧化物避雷器(MOA);相间干扰电流;有限元法;相间耦合电容;带电监测

中图分类号:TM862 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)05-0063-04

Study and Analysis on Interphase Interference to Live Line Measurement of 500 kV Metal Oxide Arrester Combined with "Field" And "Circuit"

He Dameng

(State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:A method combined with "field" and "circuit" is proposed to calculate the interphase interference during live line measurement of 500 kV metal oxide arrester (MOA), which is verified by the joint simulation with ANSYS Maxwell and EMTP. And it provides theoretical basis and practical way to reduce interference effects.

Key words:metal oxide arrester (MOA); interphase interference current; finite element method (FEM); interphase coupling capacitance; live line monitoring

0 引言

近年来,已有不少专家、学者针对 MOA 相间干扰做了大量的研究^[1-8],其中文献[8]基于模拟电荷法提出了相间耦合电流的简化模型,并应用部分电容法计算不同电压等级下的相间耦合电流。模拟电荷法的使用是在所研究的场域边界外的适当地点,用虚设的较简单的电荷分布来代替实际边界上复杂的电荷分布,其效果满足原边界条件,所以模拟电荷法的优点在于方法简单、实用性强^[9]。但是,模拟电荷法仅适用于无界的且介质种类较少以及电极形状比较简单的电场问题。然而 MOA 存在多种介质且介质分界面处形状又比较复杂,模拟电荷法就显出其局限性了^[10-12]。

下面针对上述模拟电荷法的局限性,提出了一种“场”和“路”相结合的方法。运用 ANSYS 和

EMTP 联合仿真来计算 MOA 相间干扰,先采用能较精确处理多介质分布问题的有限元法来计算 MOA 杂散电容和相间耦合电容,再结合“路”的方法计算相间干扰电流,并与实际运行数据进行对比分析。

1 分布电容计算

1.1 有限元模型建立

应用美国 ANSYS 公司的电磁场有限元分析软件 Maxwell 3D 从“场”的角度计算出 MOA 相间干扰时的耦合电容值和杂散电容值。针对最普遍的“一”字排列 500 kV 电压等级 Y20W5-444/1063W 型 MOA,建立了三维有限元模型如图 1 所示。模型由三节单元组成(忽略伞群),节与节之间用金属法兰相连接,顶部有均压环罩入,底部由金属底座支撑。

计算模型中共存在 6 种介质,MOA 各介质的相对介电常数如表 1 所示。

表 1 各介质的相对介电常数

介质	绝缘杆	SF ₆	电阻片	瓷套	空气	金属
相对介电常数	5.6	1	740	5.0	1.0	1.0

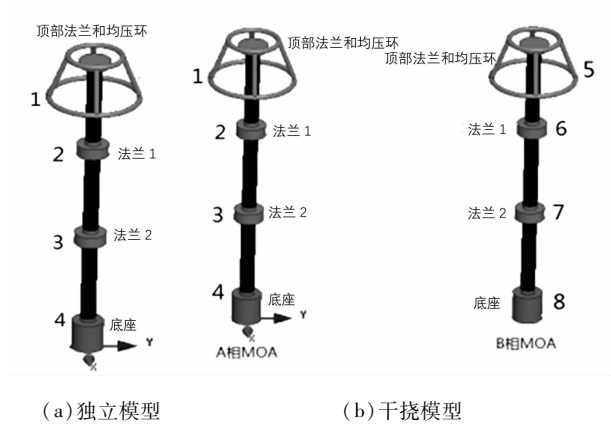


图 1 三维有限元模型

1.2 有限元法仿真计算电容值

分别给图 1(a) 的 1 到 4 号导体上施加编号为 V_1 到 V_4 的电压,给图 1(b) 的 1 到 8 号导体上施加编号为 V_1 到 V_8 的电压。则通过软件计算可得到相应的电容值如表 2、表 3 所示。

表 2 独立 MOA 电容值				单位: pF
电压	V_1	V_2	V_3	V_4
V_1		55.260	3.008	0.529
V_2	55.260		45.310	0.600
V_3	3.000	45.310		44.180
V_4	0.529	0.600	44.180	

表 3 干扰时耦合电容值								单位: 为 pF
电压	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8
V_1		55.20	2.90	0.50	3.70	1.00	0.70	0.17
V_2	55.20		45.20	0.59	1.00	0.40	0.30	0.10
V_3	2.90	45.20		43.90	0.70	0.30	0.40	0.11
V_4	0.50	0.59	43.90		0.17	0.10	0.11	0.04
V_5	3.60	1.00	0.70	0.17		55.20	2.90	0.50
V_6	1.00	0.40	0.34	0.10	55.20		45.20	0.60
V_7	0.70	0.34	0.37	0.11	2.90	45.20		43.90
V_8	0.17	0.10	0.11	0.04	0.50	0.60	43.90	

2 计算持续电流

运用电力系统和电子线路仿真软件 EMTP 的 ATP 程序搭建起相应的“路”模型,计算出相间干扰

时的持续电流值,由于 A 相和 C 相距离较大,分布电容对泄漏电流的影响较小,故可以忽略 A 相和 C 相之间的干扰影响情况。

2.1 A 相干扰情况分析

500 kV 的 MOA 每节单元有 54 块电阻片,在正常运行时,MOA 流过的电流处于小电流区,电阻片的电阻可以认为是固定值,为 4400 k Ω 。所以,考虑杂散电容后,每相 MOA 的简化模型如图 2 所示。

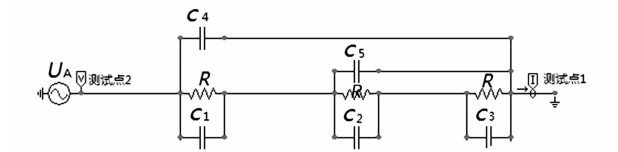
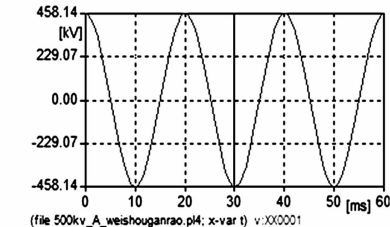
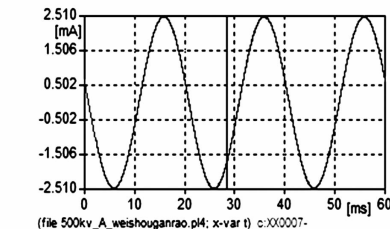


图 2 A 相 MOA 考虑杂散电容简化模型

图 2 中, U_A 是峰值为 $324 \times \sqrt{2}$ kV 的正弦电压 (Y20W5 - 444/1063W 型 MOA 的持续运行电压峰值); R 为 54 块电阻片的串联电阻值; C_1 、 C_2 、 C_3 分别为 A 相 MOA 考虑杂散电容后第 1 节、第 2 节、第 3 节单元的等效电容值; C_4 、 C_5 分别为高压端和中间法兰对地的杂散电容值 (由图 2 可以得到)。在测试点 1 和测试点 2 处分别可以测得未受干扰时的 A 相 MOA 的持续运行电压和持续电流波形,如图 3 所示。



(a) 电压



(b) 电流

图 3 未考虑相间干扰时,A 相 MOA 的持续运行电压、电流波形

从图 3 可以看出,A 相 MOA 持续运行电压峰值为 458.14 kV,持续运行电流峰值为 2.51 mA、有效

值为 1.775 mA; 电流波形超前电压波形 4.16 ms, 即 74.88° , 所以电流超前电压的相位角 74.88° , 根据投影法, 可以计算出其电流阻性分量有效值为 $I'_{RA} = I'_A \times \cos\varphi'_A = 0.463 \text{ mA}$ 。

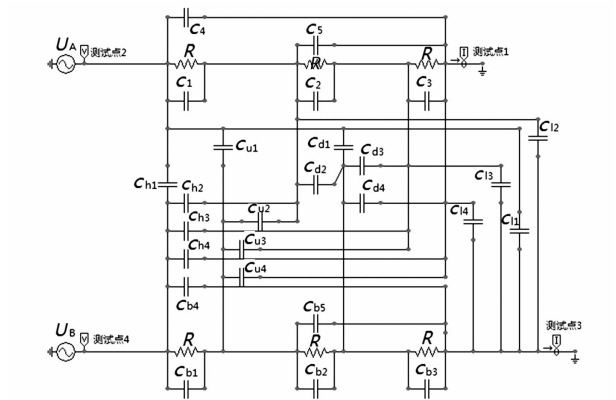


图4 B相对A相干扰的电路模型

考虑相邻 B 相 MOA 对 A 相的干扰后, 其电路模型如图 4 所示。图 4 中 $C_{h1}—C_{h4}$ 、 $C_{u1}—C_{u4}$ 、 $C_{d1}—C_{d4}$ 、 $C_{l1}—C_{l4}$ 分别为 B 相 MOA 的 5、6、7、8 号导体对 A 相 MOA 的 1、2、3、4 号导体的耦合电容, 计算结果如图 5 所示。

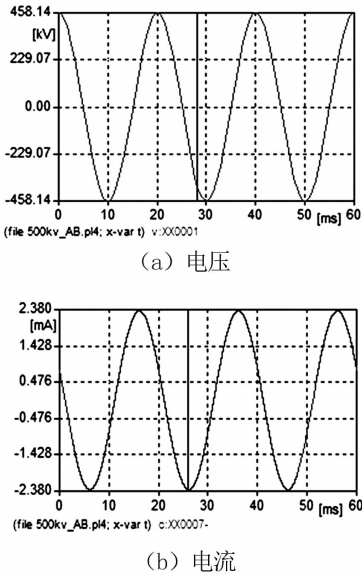


图5 B相干扰时,A相电压、电流波形

从图 5 可以看出, 有 B 相 MOA 干扰后, A 相 MOA 的持续运行电压峰值为 458.14 kV, 持续运行电流的峰值为 2.38 mA, 计算成有效值为 $I'_A = 1.683 \text{ mA}$; 电流波形超前于电压波形 3.89 ms, 即 $(3.89/20) \times 360^\circ = 69.84^\circ$, 所以电流超前电压的相位角 $\varphi'_A = 69.84^\circ$, 根据投影法, 可以计算出其电流的阻性分量有效值为 $I'_{RA} = I'_A \times \cos\varphi'_A = 0.580 \text{ mA}$ 。

对比图 3 和图 5 的计算结果可以看出, 由于 B 相

MOA 的干扰, 使得 A 相 MOA 的持续电流从 1.775 mA 减小到了 1.681 mA, 电流超前电压的相位角从 74.88° 减小到了 69.84° , 减小了 5.04° , 然而电流的阻性分量却从 0.463 mA 增加到 0.580 mA, 增加了 25.27%。

2.2 C相干扰情况分析

同理, 只需把上述图 2 和图 4 中的正弦电压 U_A 换成 C 相持续运行电压就可以求出关于 C 相的干扰情况, 如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 干扰后 C 相 MOA 的持续运行电流的峰值为 2.28 mA, 计算成有效值为 1.63 mA; 电流波形超前于电压波形 4.35 ms, 即 $(4.35/20) \times 360^\circ = 78.3^\circ$, 所以电流超前电压的相位角 φ'_C 为 78.3° , 根据投影法, 可计算其电流阻性分量的有效值为 0.327 mA。

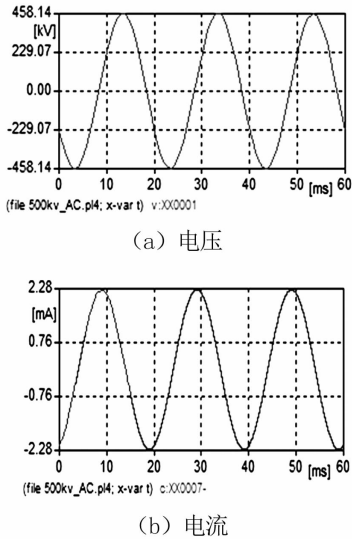


图6 B相MOA干扰时,C相的持续运行电压、电流波形

可以看出, 由于 B 相 MOA 的干扰, 使得 C 相 MOA 的持续电流从 1.775mA 减小到了 1.613 mA, 电流超前电压的相位角从 74.88° 增大到了 78.3° , 增加了 3.42° , 然而电流的阻性分量却从 0.463 mA 减小到 0.327 mA, 减小了 29.37%。

2.3 B相干扰情况分析

由于对称原理, 可以认为 A、C 两相的 MOA 对 B 相的干扰使得 B 相 MOA 的电流值有所减小, 但相位角几乎没有变化, 即全电流为 1.598 mA, 阻性电流为 0.417 mA。

3 试验数据验证

由上节分析可得到 Y20W5 - 444/1063W 型

MOA 在正常运行状态下的仿真数据,如表 4 所示。

表 4 Y20W5 - 444/1063W 型 MOA
正常运行状态下仿真数据

参数	A 相	B 相	C 相
全电流 I_{XP}/mA	1. 683	1. 598	1. 613
阻性电流 I_{RP}/mA	0. 580	0. 417	0. 327
容性电流 I_{CP}/mA	1. 580	1. 543	1. 579
相角/ $^{\circ}$	69. 840	74. 880	78. 300

在相同的被试环境下,可得到该型 MOA 在正常运行状态下的阻性电流试验数据,如表 5 所示。

表 5 Y20W5 - 444/1063W 型 MOA
正常运行状态下阻性电流试验数据

参数	A 相	B 相	C 相
全电流 I_{XP}/mA	2. 071	1. 884	2. 000
阻性电流 I_{RP}/mA	0. 481	0. 245	0. 037
容性电流 I_{CP}/mA	2. 014	1. 868	2. 000
相角/ $^{\circ}$	76. 550	82. 500	88. 930

从表 5 可以知道,A、C 相全电流基波值相等且略大于 B 相,阻性电流基波分量 C、B、A 三相呈递增分布。可见现场测试的环境对测量影响很大。

把表 4 的仿真数据和表 5 的试验数据进行对比可以看出:

1)相间通过耦合电容干扰,使得 MOA 原有持续电流 I_A 、 I_B 、 I_C 变成了 I'_A 、 I'_B 、 I'_C ,新的持续电流不仅角度发生了变化,幅值也有所改变。如果原来 $I_A = I_B = I_C$,则有 $I'_A > I'_C > I'_B$,且电压电流的夹角为 $\varphi'_C > \varphi'_B > \varphi'_A$ 。

2)仿真数据的角度偏差为:A 相偏差了 5. 04°,B 相几乎无偏差,C 相偏差了 3. 42°,这完全符合理论推导 3°~5°的偏差。然而,试验数据的偏差却为:A 相偏差了 5. 95°,B 相认为无偏差,C 相偏差了 6. 43°。

3)仿真数据比试验数据偏小。出现这种情况的原因有:①仿真中只考虑了基波,即认为电压中不会有谐波干扰,而实际现场测量中,电压会受到谐波干扰,从而数值会比仿真数值大;②仿真中忽略了避雷器伞群的影响,从而忽略了伞群对耦合电容的影响,这会使得耦合电容值变大,从而仿真数值有所偏小;③现场试验测试时,避雷器表面有污垢,测试时的天气状况等因素会使得测试数据有所偏大;④避雷器长期运行,电阻片会有所老化,从而测试数据也会比仿真数据偏大;⑤测试设备本身也有误差,可能使得测试数据偏大。

4 结 语

针对 MOA 相间干扰引起的误差问题,根据仿真数据和相关试验数据中电压、电流、相位角的变化规律,采取对相角进行适当修正的方法来减小相间干扰的影响,即将所测量得到的 φ'_A 增加 3°~5°, φ'_C 相应减小 3°~5°,A 相和 C 相的 I'_A 和 I'_C 的值在所测得 B 相的 I'_B 值基础上适当调大 10%,这样就可以消除相间干扰所带来的误差了。

参考文献

[1] 杨殿成. 金属氧化物避雷器带电测试干扰分析[J]. 高压电器,2009,45(5):130-132.

[2] 高峰,郭洁,徐欣,等. 交流金属氧化物避雷器受潮与阻性电流的关系[J]. 高电压技术,2009,35(11):2629-2633.

[3] 张泽华. MOA 带电测试的现场干扰问题[J]. 高电压技术,2001,27(104):73-74.

[4] 赵伟,万德均,岳建民. 金属氧化物避雷器带电测量相间干扰研究[J]. 仪器仪表学报,2006,27(1):87-90.

[5] 胡道明,潘文霞. 考虑两种干扰源下的 MOA 在线监测数学模型探讨[J]. 电力自动化设备,2004,24(12):67-69.

[6] 徐志钮,赵丽娟,丁傲,等. 一种新的 MOA 阻性电流提取算法[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):47-51.

[7] 王洪新,贺景亮. 氧化锌避雷器在线监测中相间干扰的分析研究[J]. 高电压技术,1997,23(2):26-30.

[8] 唐炬,苟海丰,张新强,等. 用部分电容法计算和消除相间干扰[J]. 重庆大学学报,1999,22(6):41-46.

[9] 任新宇. 模拟电荷法原理及其应用概述[J]. 科学之友,2009,4(11):1-3.

[10] 丁品南,钟雅风,颜文. 氧化锌避雷器阻性电流测量仪的研制及其应用[J]. 中国电力,2000,33(2):48-50.

[11] 郭洁,何计谋,李晓峰. 750 kV 金属氧化物避雷器电位分布研究[J]. 中国电力,2006,39(1):15-17.

[12] 颜旭,陈绍东,江润志,等. 自然雷电下氧化锌避雷器残压特征分析[J]. 中国电力,2013,46(7):72-76.

作者简介:

何大猛(1988),硕士、工程师,研究方向为电气设备电磁分析与电力系统过电压防护。

(收稿日期:2018-05-19)

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¹, 范建兵¹, 张洪国², 赵学花¹

(1. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830002;
2. 国网山东龙口供电公司, 山东 烟台 264000)

摘要:为了提高火电厂抵御风险能力,建立了一种新的火电厂安全风险评估的数学模型。结合影响火电厂的致灾因素,在确立了多层次的安全性评价指标的基础上,应用IAHP、系统分析法及IFCEM通过横向及纵向的功能扩展结构比较,全面系统地得出火电厂的安全风险状况。该模型很好地解决了传统方法忽略各致灾因素相互作用的协调性以及一致性检验繁琐、主观因素干扰性强、单一方法结果说服力差等问题。应用结果表明,所建模型与实际基本相符。
关键词:火电厂安全风险评估模型;改进层次分析法;系统分析法;改进模糊综合评价法
中图分类号:TM621 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)05-0067-06

Safety Risk Assessment Model of Coal – fired Power Plant Based on IAHP, System Analysis and IFCEM

Min Lingmin¹, Fan Jianbing¹, Zhang Hongguo², Zhao Xuehua¹

(1. State Grid Xinjiang Economic Research Institute, Urumqi 830002, Xinjiang, China;
2. State Grid Shandong Longkou Electric Power Supply Company, Yantai 264000, Shandong, China)

Abstract:In order to improve the ability to resist risks for coal – fired power plants, a new mathematical model of safety risk assessment for coal – fired power plants is established. Combined with the influencing factors of thermal power plants, and based on the established multi – level security evaluation index, the comprehensive security risk condition of coal – fired power plant is obtained with the horizontal and vertical comparison of function extension structure by applying IAHP, system analysis and IFCEM. The model is very good to solve the interaction factors coordination, trivial consistency check, strong interfere of subjective factors and low persuasibility of single method result, and the application results show that the proposed model is consistent with the actual situation.
Key words:safety risk assessment model of power plant; improved analytic hierarchy process; system analysis method; improved fuzzy comprehensive evaluation method

0 引言

随着 society 对电力需求不断增大、发电厂不断增多,重大安全事故的出现频率也不断升高,事故的危害程度也越来越大,因此建立有效的火电厂安全风险评估模型变得很有必要。

有众多学者专家对火电厂安全风险评估建模,但数据、方法单一^[1],结论说服力差;或者过程方法不利于计算机编程推广普及^[2];或者评判具有很强的主观分析因素影响^[3];或者忽略了各个致灾因素

相互作用的协调性对评估结果产生影响^[4]。

下面通过运用改进层次分析法(improved analytic hierarchy process, IAHP)把复杂的目标问题分解成层次结构,然后分析各因素的重要度进而得出目标权度,以此来判断评估。该方法打破了诸如“总体安全”等的模糊性评判,使之量化,有利于计算机编程普及,又省去了传统层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)一致性检验繁琐问题。该法可以纵向得出评估因素的重要度。

系统分析法主要用来解决系统线性与非线性问题^[5],而且可对系统整体功能进行分析^[6]。这里创新

性地从系统论角度出发,结合层次分析法,综合考察火电厂多种致灾维度的相互作用,最后构造出系统安全优势函数,可横向得出火电厂总体安全评估状况。

该模型的另一大创新点就是改进了传统模糊综合评价法 (fuzzy comprehensive evaluation method, FCEM)。通过灰色分析法与检查表统计法相结合的方法,很好地解决了隶属度函数受主观干扰性强问题,该法可纵向得出各指标的落实度又可横向对火电厂进行总体安全评估,其结果可与上面两种方法的评估结果进行比较,相互验证,使评估结果更具说服力。

1 模型的建立

该模型由 3 种方法组成,IAHP 既是后面两种方法的统计基础,又可单独得出各指标的权度。系统分析法从准则层与目标层的关系出发,构建出反映两者关系的系统安全优势函数。改进模糊综合评价法(improved fuzzy comprehensive evaluation method, IFCEM)则是通过统筹 3 个层结构的关系,全面系统地得出各个维度的评估状况。以上 3 者横纵比较,互为佐证。

1.1 改进层次分析法 (IAHP)

- 计算的基本步骤如下^[7-9]:
1) 建立基于多种影响维度的递阶层次结构模型。划分目标层、准则层、指标层等,以此建立起层次分析图。
2) 邀请专家和业务精英确立权重指标,构造判断矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} = [A_{ij}]_{nn} \quad (1)$$

式中, A_{ij} 表示 A_i 与 A_j 对目标的影响值之比。

- 计算重要度排序指数 r_i
 $r_i = \sum_{i=1}^n A_i$, 取 $r_{\max} = \max(r_i)$,
 $r_{\min} = \min(r_i)$, $k_m = \frac{r_{\max}}{r_{\min}}$
4) 得出构造矩阵 $[B_{ij}]$

$$B_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}}(k_m - 1) + 1, & r_i \gg r_j \\ \left[\frac{r_j - r_i}{r_{\max} - r_{\min}}(k_m - 1) + 1 \right]^{-1}, & r_i < r_j \end{cases} \quad (2)$$

- 求得传递矩阵 $[C_{ij}]$
 $C_{ij} = \lg B_{ij}, i = 1, 2, \cdots, n$ (3)
6) 求 C_{ij} 的最优传递矩阵 $[D_{ij}]$
 $D_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (C_{ik} - C_{jk})$ (4)
7) 求 $[A_{ij}]$ 的拟优一致矩阵 $[A'_{ij}]$
 $A'_{ij} = 10^{D_{ij}}$ (5)

由 A'_{ij} 得矩阵特征向量,按列归一 $t_{ij} = \frac{A'_{ij}}{\sum_{k=1}^n B'_{kj}}$,进行层次单排序,得到层次总排序,进而得到各因素各层权重 $w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_{ij} (i = 1, 2, \cdots, n)$,确定首要的目标影响因素。

1.2 系统功能论

设影响火电厂系统安全指标 X 的 n 个维度为 $x = (x_1, x_2, \cdots, x_n) \in X$,系统整体功能 W ,那么火电厂系统安全优势函数的数学模型为

$$W = \varphi(x_1, x_2, \cdots, x_n) = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i>j=1}^n \alpha_{ij} x_i x_j + \sum_{i>j>k=1}^n \alpha_{ijk} x_i x_j x_k + \cdots + \alpha_{12 \cdots n} \prod_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

式中: $\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i$ 为线性部分;其余高阶项为非线性部分,其中各项系数 α 为相应组合项的功能系数。在系统中某些因素是相互作用的,作用的效果不仅与这些因素各自发挥作用的大小有关,而且与配合的适度性有关,主要体现在各项系数 α 方面^[10]。

1.3 改进模糊综合评价法 (IFCEM)

IFCEM 较传统 FCEM 主要在隶属度函数的构建上进行了改进,抛弃了单纯根据模糊数学理论构造隶属函数方法,引进了检查表统计法,又与灰色分析法结合,两者隶属结果求均值,这样最大程度结合实际情况,限制了隶属函数主观因素干扰性。

- IFCEM 基本步骤如下^[11]:
1) 模糊综合评价指标的构建。确定评价对象元素域 $U = \{\mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_p\}$, 评价等级域 $V = \{\nu_1, \nu_2, \cdots, \nu_q\}$ 。
2) 构建各个层权重向量。第 1 层次 $A = \{a_1, a_2, \cdots, a_m\}$,第 2 层次 $A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \cdots, a_{in}\}$ 。
3) 进行单因素模糊评判。确定单一因素对评价元素的隶属程度,得到单因素评判集 R_m 。
①灰色分析法:组织专家评分并填表,由 m 个专家对指标 C_{ij} 得出评分 d_{ijm} 。根据评价标准的评分等级标准,拟用 4 个评价灰度。灰度序号 $e = 4, 3, 2,$

1,分别代表“差”、“中”、“良”、“优”。对应的灰度及白化权函数如下:

第 1 灰度“优”($e = 1$), 设定灰度 $\otimes 1 \in [4, \infty]$, 白化权函数为 f_1 , 同理第 2、第 3、第 4 类分别设定 $\otimes 2 \in [0, 3, 6]$, $\otimes 3 \in [0, 2, 4]$, $\otimes 4 \in [0, 1, 2]$, 对应白化权函数分别为 f_2 f_3 f_4 , 表达式如下:

$$f_1(d_{ijm}) = \begin{cases} \frac{d_{ijm}}{4} & d_{ijm} \in [0, 4] \\ 1 & d_{ijm} \in [4, \infty] \\ 0 & d_{ijm} \in (-\infty, 0) \end{cases} \tag{7}$$

$$f_2(d_{ijm}) = \begin{cases} \frac{d_{ijm}}{3} & d_{ijm} \in [0, 3] \\ \frac{(6 - d_{ijm})}{3} & d_{ijm} \in [3, 6] \\ 0 & d_{ijm} \in [0, 6] \end{cases} \tag{8}$$

$$f_3(d_{ijm}) = \begin{cases} \frac{d_{ijm}}{2} & d_{ijm} \in [0, 2] \\ \frac{(6 - d_{ijm})}{2} & d_{ijm} \in [2, 4] \\ 0 & d_{ijm} \in (-\infty, 0) \cup (4, \infty) \end{cases} \tag{9}$$

$$f_4(d_{ijm}) = \begin{cases} 2 - d_{ijm} & d_{ijm} \in [1, 2] \\ 1 & d_{ijm} \in [0, 1] \\ 0 & d_{ijm} \in (-\infty, 0) \cup (2, \infty) \end{cases} \tag{10}$$

计算灰色评价系数,进而计算灰色评价隶属度 r_{ije} :

$$X_{ije} = \sum f_e(d_{ijm}), m \in [1, p] \tag{11}$$

$$X_{ij} = \sum X_{ije}, e \in [1, 4]$$

$$r_{ije} = \frac{X_{ije}}{X_{ij}}, r_{ije} = (r_{ij1}, r_{ij2}, r_{ij3}, r_{ij4}) \tag{12}$$

②检查表统计法:相对于传统检查表,给予每个检查项目以评价等级,然后求出每个评价等级的相对比例,即为权度,以此求出该项目隶属度,具体形式如表 1。

序号	检查内容	评语等级			
		优	良	中	差
...	...	...	...	...	...
	r'_{ijm} 的隶属度	r'_{ij1}	r'_{ij2}	r'_{ij3}	r'_{ij4}

③单因素判断集 R_m

$$R_m = \left(\frac{r_{i1} + r'_{i1}}{2}, \frac{r_{i2} + r'_{i2}}{2}, \dots, \frac{r_{in} + r'_{in}}{2} \right)$$

$$= (r_{m1}, r_{m2}, \dots, r_{mn}) \tag{13}$$

将各因素评价集的隶属度组成矩阵:

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \tag{14}$$

4) 进行模糊综合评判

$$\tilde{B} = \tilde{A} \tilde{R} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}^T \tag{15}$$

b_j 代表评判对象对备择集第 j 个元素的隶属程度。

5) 求综合评价结果。 S 为综合评价价值, C 为赋值向量, 此处 $C = (4, 3, 2, 1)$, 有 $S = BC^T$ 。

2 火电厂安全评估模型的实例应用

2.1 IAHP 分析过程

1) 以里彦火电厂为例,其整体安全作为目标建立递阶层次结构^[12],如图 1 所示。

2) 计算矩阵特征值。

①得出比较矩阵 $[A_{ij}]$, 计算出重要性排序指数 r_i 。

$$[A_{ij}] = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 & B_3 \\ B_1 & 1 & 2 & 2 \\ B_2 & 0 & 1 & 0 \\ B_3 & 0 & 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} r_i \\ 5 \\ 1 \\ 3 \end{matrix}, k_{\max} = \frac{r_{\max}}{r_{\min}} = \frac{5}{1}$$

②求判断矩阵 $[B_{ij}]$

③求传递矩阵 $[C_{ij}]$

④求最优传递矩阵

⑤求拟优一致矩阵 $[A'_{ij}]$

$$[A'_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 6.081 & 2.466 \\ 0.164 & 1 & 0.843 \\ 0.406 & 1.186 & 1 \end{bmatrix}$$

⑥归一化处理得最终特征向量

$$W_{A-B} = (0.655, 0.137, 0.208)$$

同理可得:

$$W_{B_1-C} = (0.455, 0.347, 0.108, 0.090)$$

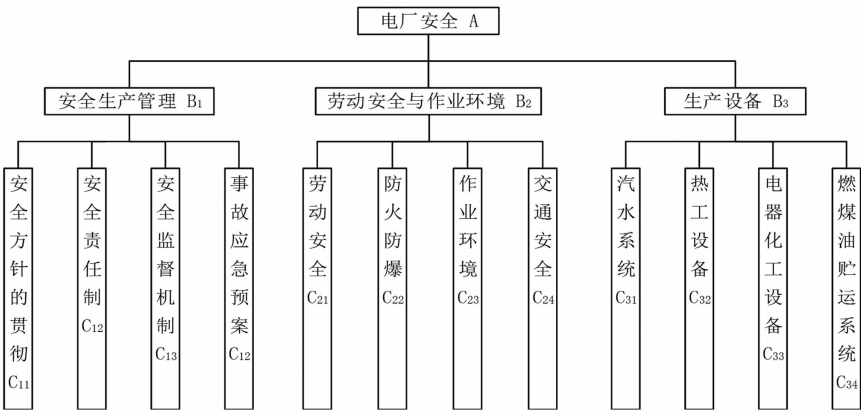


图 1 火电厂安全评价递阶层次结构

表 2 C 层权重结果及排序

C	B ₁ = 0.655	B ₂ = 0.137	B ₃ = 0.208	C 层目标权重	排序
C ₁₁	0.455	0	0	0.298 025	1
C ₁₂	0.347	0	0	0.227 285	2
C ₁₃	0.108	0	0	0.070 740	5
C ₁₄	0.090	0	0	0.058 950	6
C ₂₁	0	0.349	0	0.047 813	7
C ₂₂	0	0.349	0	0.047 813	7
C ₂₃	0	0.168	0	0.023 016	10
C ₂₄	0	0.134	0	0.018 358	11
C ₃₁	0	0	0.374	0.077 792	3
C ₃₂	0	0	0.088	0.018 304	12
C ₃₃	0	0	0.343	0.071 344	4
C ₃₄	0	0	0.195	0.043 264	9

$W_{B_2-C} = (0.349, 0.349, 0.168, 0.134)$

$W_{B_3-C} = (0.374, 0.088, 0.343, 0.195)$

3)得到层次总排序

总排序如表 2 所示。

4)结果分析讨论

火电厂决策者可根据表 2 层次总排序来确定防护工作的先后顺序。C₁₁权重排序最大,说明安全方针的贯彻是首要,在下一步工作应有针对性地加强;其次是 C₁₂,说明安全责任制的重要性次之。

2.2 系统功能论应用

由 IAHP 纵向地对火电厂安全风险进行评估,得出安全方针的贯彻是风险预防的首要,下面计算系统在同一层次的横向功能扩展结构。表达式为

$$\begin{aligned} f_1 &= \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \\ f_2 &= \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n \beta_{ij} x_i x_j \\ &\vdots \\ f_n &= \xi \prod_{i=1}^n x_i \end{aligned}$$

式中,α_i、β_{ij}、ξ 是相应组合项功能系数。得出系统安

全优势函数如下:

$$\begin{aligned} F(X) &= f_1 + f_2 + \cdots + f_n \\ &= \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n \beta_{ij} x_i x_j + \xi \prod_{i=1}^n x_i \end{aligned}$$

准则层中 B₁、B₂、B₃ 分别设为 x₁、x₂、x₃。设 f₁、f₂、f₃ 为准则层因素的线性组合、2 项整合、3 项整合,权重比为 y₁、y₂、y₃,那么 y₃ > y₂ > y₁,判断矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

得到 W_f = [0.105, 0.258, 0.637]。

由上节得 W_{f1} = W_{A-B} = (0.655, 0.137, 0.208)。

x₁、x₂、x₃ 两两整合对目标层贡献得 f₂,令 B₁、B₂ 整合为 z₁(x₁x₂), B₁、B₃ 整合为 z₂(x₁x₃), B₂、B₃ 整合为 z₃(x₂x₃),易得权重关系 z₁ > z₂ > z₃,矩阵 F₂为

$$F_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

得到 W_{f2} = [0.637, 0.258, 0.105]。

x_1, x_2, x_3 三项整合对系统目标贡献得 f_3 , 易得 $W_{f_2} = [1]$ 。系统的安全优势函数可得:
 $F(X) = W_y(f_1, f_2, f_3)$
 $= 0.105f_1 + 0.258f_2 + 0.637f_3$
 $= 0.105W_{f_1}x_i + 0.258W_{f_2}x_ix_j + 0.637W_{f_3}\prod_{i=1}^3x_i$
 $= 0.068\ 8x_1 + 0.014\ 4x_2 + 0.021\ 8x_3 + 0.164\ 3x_1x_2 + 0.066\ 6x_1x_3 + 0.027\ 1x_2x_3 + 0.637x_1x_2x_3$
上式就是基于系统功能论的火电厂安全评价数学模型。可采用德尔菲法计算 x , 再计算 $F(X)$ 就能得出火电厂整体安全评估值。

对 x 进行赋值和计算, $x = 4, 3, 2, 1$ 分别定义为安全状态为优、良、中、差。 $F(x = 4) = 45.316, F(x = 3) = 19.836, F(x = 2) = 6.338, F(x = 1) = 1$, 得出指标等级标准见表 3。
通过专家评分得该火电厂的 $x_1 = 3.015, x_2 = 2.974, x_3 = 3.138, F(x) = 20.598$, 总体来看, 该火电厂安全状况为优级。

表 3 指标等级标准	
指标等级	综合评价值
优	$19.836 \leq F \leq 45.316$
良	$6.338 \leq F \leq 19.836$
中	$1 \leq F \leq 6.338$
差	$0 \leq F \leq 1$

2.3 IFCEM 分析过程

1) 隶属矩阵的确立

表 4 指标评分总表及灰色权向量

指标	专家										灰色评价权向量			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	r_{ij1}	r_{ij2}	r_{ij3}	r_{ij4}
C_{11}	3	2.5	4	2	3.5	2.5	2	2.5	2.5	2	0.312 4	0.369 3	0.318 3	0
C_{12}	2	3.5	2	2.5	2	2.5	2.5	4	3	2.5	0.312 4	0.369 3	0.318 3	0
C_{13}	2.5	3	2	3.5	2.5	3	2	2.5	2	4	0.317 6	0.376 5	0.305 9	0
C_{14}	3.5	2	2.5	3	2.5	3.5	2	2.5	3	3	0.302 3	0.372 1	0.325 6	0
C_{21}	2.5	3	2	2.5	2	2.5	3.5	2.5	3	2	0.292 5	0.374 8	0.332 7	0
C_{22}	2.5	2	2.5	2.5	3	3	3	2	4	2	0.307 5	0.379 2	0.313 3	0
C_{23}	3	3.5	4	2.5	2	2.5	3.5	3	3	2.5	0.349 1	0.402 4	0.248 5	0
C_{24}	2	4	3	3	2.5	2.5	3	2.5	2	2	0.307 5	0.379 2	0.313 3	0
C_{31}	2.5	3	2.5	2.5	3.5	2	4	2	2.5	3.5	0.333 3	0.381 0	0.285 7	0
C_{32}	3	2.5	2	2.5	2	3	2.5	2.5	3	3.5	0.302 8	0.388 6	0.308 6	0
C_{33}	2.5	2	2.5	3.5	2.5	2	3	2.5	2.5	2	0.287 4	0.367 8	0.344 8	0
C_{34}	3.5	2	3	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3	0.297 8	0.381 6	0.320 6	0

①灰色评价法确立隶属度

选取 10 位专家进行评分如表 4 所示。对评价指标 C_{11} , 受评系统灰色评价系数 X_{11e} :
 $e = 1, X_{111} = f_1(3) + f_1(2.5) + \cdots + f_1(2)$
 $= 0.75 + 0.625 + \cdots + 0.5 = 6.625$
 $e = 2, X_{112} = f_2(3) + f_2(2.5) + \cdots + f_2(2)$
 $= 1 + 0.833 + \cdots + 0.667 = 7.833$
易得 $e = 3$ 时, $X_{113} = 6.75$; $e = 4$ 时, $X_{114} = 0$ 。
 C_{11} 的总灰色评价数 $X_{11} = 6.625 + 7.833 + 6.75 = 21.208$ 。

灰色权向量及权矩阵 $r_{111} = 0.312\ 4$, 同理得到: $r_{112} = 0.369\ 3, r_{113} = 0.318\ 3, r_{114} = 0$ 。

得 C_{11} 灰色权向量 $r_{11} = (0.312\ 4, 0.369\ 3, 0.318\ 3, 0)$, 同理得到其他受评对象灰色权向量, 结果见表 4。

②检查表统计法确立隶属度, 隶属结果如表 5 所示。

由上可得, 安全监督体系 C_{13} 跟防火防爆 C_{22} 、交通安全 C_{24} 工作实际落实度需进一步加强。

③单因素评判集 R_m

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.373\ 7 & 0.358\ 65 & 0.267\ 65 & 0 \\ 0.340\ 7 & 0.342\ 65 & 0.316\ 65 & 0 \\ 0.307\ 3 & 0.354\ 75 & 0.337\ 95 & 0 \\ 0.365\ 65 & 0.329\ 05 & 0.305\ 3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = W_{B_1-C} R_1 = (0.354, 0.350, 0.296, 0)$$

$$\text{同理, } B_2 = (0.335, 0.368, 0.297, 0)$$

$$B_3 = (0.371, 0.346, 0.283, 0)$$

表 5 检查表统计表隶属度结果

指标	检查表评价权向量			
	r'_{ij1}	r'_{ij2}	r'_{ij3}	r'_{ij4}
C_{11}	0.435	0.348	0.217	0
C_{12}	0.369	0.316	0.315	0
C_{13}	0.297	0.333	0.370	0
C_{14}	0.429	0.286	0.285	0
C_{21}	0.333	0.455	0.212	0
C_{22}	0.353	0.294	0.353	0
C_{23}	0.474	0.316	0.210	0
C_{24}	0.304	0.304	0.392	0
C_{31}	0.417	0.333	0.250	0
C_{32}	0.368	0.316	0.316	0
C_{33}	0.449	0.310	0.241	0
C_{34}	0.471	0.286	0.243	0

得 $B=AR=(0.355,0.352,0.293,0)$ 。

综合评判 $S=BC^T=3.062$ 。该火电厂总体安全状况为优性指标。

同理,各准则层安全状况为 $S_i=B_iC^T$,各指标层 $S_{ij}=R_{ij}C^T$,得其他关系层评估指标如表 6。

表 6 准则层、指标层评估结果

评价层级	指标	分数	等级
准则层 B_i	S_1	3.058	优
	S_2	3.038	优
	S_3	3.088	优
	S_{11}	3.106	优
指标层 C_{ij}	S_{12}	3.024	优
	S_{13}	2.969	良
	S_{14}	3.060	优
	S_{21}	3.040	优
	S_{22}	2.997	良
	S_{23}	3.182	优
	S_{24}	2.953	良
	S_{31}	3.107	优
	S_{32}	3.023	优
	S_{33}	3.075	优
	S_{34}	3.102	优

3 结 语

该综合模型的建立可以从多个维度对火电厂安全状况进行评估。

1)IAHP 纵向得出各个致灾因素的权度,这确定了优先管理的次序,可给管理部门决策提供重要依据。从权度数据结果来看,安全方针的贯彻及安全责任制的落实在重要性属前两位,在下一步工作中应有针对性地加强,这同时也说明了管理因素为整体火电厂安全的主导因素。

2)系统分析法能整体性地横向得出火电厂的安全状况,综合性地考虑了多种维度相互作用的协调性。尤其是系统安全优势函数模型的建立过程,在类似模型上具有很强的推广度。从实例来看,其结果基本符合火电厂的实际运行安全状况。

3)IFCEM 的运用,尤其是灰色评价法与检查表统计法的结合,在一定程度上降低了评判的主观随意性,使结果具有很大的参考价值,该方法对各个指标层、准则层以及总体目标层的实际运行状况进行评估,管理者可以根据结果有针对性的整改。

4)另外系统分析法评估结果可以跟 IFCEM 的目标层评估结果做对比,以此相互验证;IAHP 得出的权度排序跟 IFCEM 指标层评估结果对比,得出管理者应优先注意的致灾因素以及实际落实较薄弱的因素,这对下一步工作开展具有指导意义。

参考文献

[1] 施泉生,詹必雄.模糊决策方法在电厂安全评价中的应用[J].华东电力,2003,31(12):11-13.

[2] 夏晨曦.火电厂基于 AHP 安全评价方法的比较分析[J].能源与节能,2013(3):34-36.

[3] 杨辉,戴世山,丁以斌.模糊综合评价法在火电厂安全生产中的应用[J].湖南有色金属,2010,26(5):50-52.

[4] 施泉生,徐娜娜.层次灰色分析法在电厂安全评价中的应用[J].上海电力学院学报,2005,21(1):81-84.

[5] 高隆昌.系统学原理[M].北京:科学出版社,2005.

[6] 普明初,高隆昌.企业竞争优势及其系统分析[J].武汉经济管理干部学院学报,2002,16(2):36-39.

[7] 谢进伸,于惠源.改进的层次分析法在事故分析中的应用[J].工业安全与防尘,1994(2):24-27.

[8] 胡安鑫,谢英,苏欣.改进层次分析法在确定油库安全因素权重中的应用[J].石油化工安全技术,2005,21(5):13-15.

[9] 周毅,赵晓刚.层次灰色评价法在油库火灾危险评估中的应用[J].油气储运,2012,31(9):697-700.

[10] 袁小勃.基于系统功能论的工业安全评价机理研究[D].洛阳:河南科技大学,2007.

[11] 杨松林.工程模糊论方法及其应用[M].北京:国防工业出版社,1996.

[12] 刘俭.火力发电电厂安全性评价(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2001.

作者简介:
闻令民(1988),硕士研究生,研究方向为电力工程造价。
(收稿日期:2018-05-06)

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¹, 翁 钰², 贾志杰¹, 陈 杰³, 董汉彬¹
(1. 国网四川省电力公司电力科学研究所, 四川 成都 610041; 2. 西安工业大学, 陕西 西安 710021;
3. 四川科锐得实业集团公司, 四川 成都 610041)

摘 要:对一起 LW6-220 型 SF₆ 断路器故障进行了分析, 通过对故障断路器试验研究及解体分析, 找到了此次事故的原因, 为绝缘拉杆松动。结合现场情况, 对该型断路器的运行维护提出了预防性的措施和建议, 为该型设备能够继续良好的运行提供了强有力技术支持。
关键词: LW6-220; 断路器; 绝缘拉杆; 防范措施
中图分类号: TM561 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2018)05-0073-03

Analysis and Research on Protecting Measures for Insulated Pole Fault of Circuit Breakers

Wang Jiayi¹, Weng Yu², Jia Zhijie¹, Chen Jie³, Dong Hanbin¹
(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shanxi, China;
3. Sichuan Keruide Industrial Group Corporation, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: A typical insulated pole fault of LW6-220 circuit breakers is analyzed. Through experimental research and disassembling analysis, the main reason of this insulated pole fault is found out. Combined with the operation condition, the preventive measures and suggestions for operation and maintenance of LW6-220 circuit breakers are proposed, which provides a technical support for continuous operation of this type of circuit breakers.
Key words: LW6-220; circuit breaker; insulated pole; protecting measures

0 引 言

高压断路器作为电力系统中的重要设备,起着控制和保护的双重作用,其性能对电网运行的稳定性以及供电的可靠性有直接影响^[1-4]。LW6-220 型断路器作为中国早期自主研发的主流 SF₆ 断路器之一,在四川电网使用较多。近年来,随着电网规模不断发展,该型设备故障频发,给电网运行带来较大威胁^[5-10]。

下面以某 220 kV 变电站的一起 LW6-220 型断路器绝缘拉杆松动事故为例,通过试验研究及解体分析,找出发生故障的主要原因;最后,结合现场情况,对该型断路器的运行维护提出了预防性的措施和建议^[8-10]。

1 故障概况

1.1 故障前变电站的运行方式

2016 年 1 月 28 日 20:55:54,某 220 kV 变电站桥棉线 261 断路器 B 相发生拉杆松脱故障。故障前该 220 kV 变电站 220 kV I、II 母并列运行,旁母热备用;220 kV 桥棉线 261 号断路器、棉竹线 270 号断路器、棉汉一线 268 号断路器、1 号主变压器 201 断路器运行于 220 kV I 母;220 kV 棉汉二线 266 号断路器、坝棉线 267 号断路器、南棉线 262 号断路器、2 号主变 202 断路器运行于 220 kV II 母;110 kV 松棉线运行于 110kV III 母。运行方式如图 1 所示。

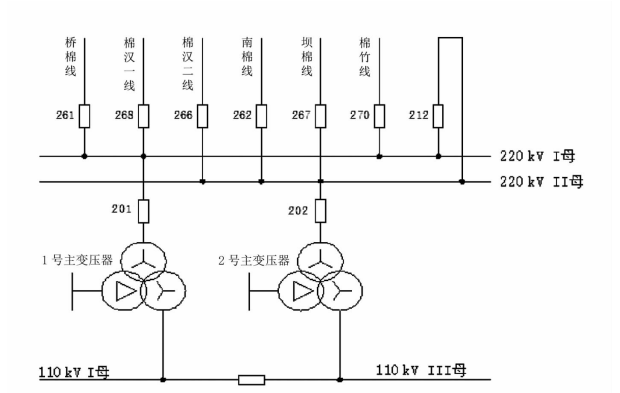


图 1 某 200 kV 变电站主接线

1.2 故障情况

2016 年 1 月 28 日 20:55:54,220 kV 桥棉线 B 相发生接地故障,约 20 ms,站侧 1 号保护纵联差动,2 号保护纵联零序、纵联距离保护动作出口,B 相断路器单相跳闸不成功;同时,对应电厂侧 1 号保护纵联差动、2 号保护纵联距离保护动作,断路器跳闸。

桥棉线断路器 B 相单相跳闸失败后,沟通三相跳闸启动,170 ms 后三相跳闸,A、C 相跳闸成功,B 相未跳开。约 330 ms,母差失灵保护动作,420 ms 后 220 kV I 母所有断路器间隔(桥棉线、棉竹线、棉汉一线、1 号主变压器 201 断路器)及母联 212 断路器跳闸(桥棉线断路器跳闸不成功),所有电源全部消失,故障切除。同时,因母差失灵保护动作切除 220 kV 棉汉一线,站安控装置动作,切除 220 kV 坝棉线及 110 kV 松棉线。

故障发生后,值班员现场检查发现:220 kV 桥棉线 261、棉竹线 270、棉汉一线 268、坝棉线 267、母联 212、1 号主变压器 201 和 110 kV 松棉线 153 等断路器均位于分闸位置。结合故障录波分析,可以初步推断出桥棉线 261 断路器 B 相故障时并未分闸到位。

1.3 故障断路器信息

该 220 kV 变电站共有 7 台 LW6-220 型 SF₆ 断路器,出厂日期均为 1999 年 7 月,投运日期均为 2001 年 4 月,额定电流为 3150 A,额定短路开断电流为 40 kA。

LW6-220 型断路器主要由灭弧室、均压电容器、三联箱、支柱、联接座、密度继电器、动力单元等部分组成,具体结构如图 2 所示。

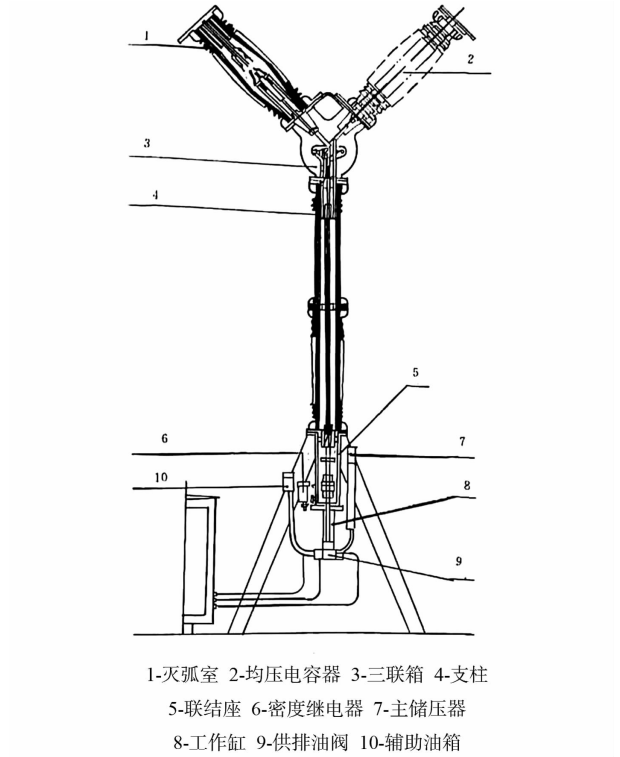


图 2 LW6-220 型断路器单极剖面

2 试验检查

为了分析故障原因,对桥棉线 261 断路器进行试验检查,测试三相分闸时间、合闸时间、回路电阻、断口绝缘数据如表 1 所示。

表 1 桥棉线 261 断路器试验数据

项目	A 相		B 相		C 相	
	A1	A2	B1	B2	C1	C2
分闸时间/ms	27.3	27.2	25.9	23.6	27.2	27.2
分闸相间不同期/ms	3.7					
合闸时间/ms	71.8	71.9	63.7	63.8	72.9	72.9
合闸相间不同期/ms	9.2					
回路电阻/μΩ	63		66		53	
断口绝缘电阻/MΩ	5000		5000		5000	
总行程/mm	151		130		152	

由表 1 可得,断路器合闸时三相回路电阻值均属于正常范围,说明断路器三相合闸均到位;断路器分闸时断口间绝缘电阻值属于正常范围,说明断路器三相均已分闸;B 相分、合闸时间均比其他两相明显偏小,分、合闸相间不同期均严重超过“≤2 ms”的标准要求;B 相总行程比标准值 150 mm 小了 20 mm,说明该相可能出现了分闸不到位。

3 解体检查

为进一步确定故障原因,对桥棉线 261 断路器 B 相本体进行了返厂解体检查。解体后发现,桥棉线 261 断路器 B 相绝缘拉杆下部与金属拉杆的螺纹连接处弹簧退丝严重,达到一圈半左右(如图 3 所示),折合拉杆竖直方向移动距离 20 mm,相当于绝缘拉杆被加长,同时螺纹连接处的粘接材料硬化脱落。



图3 绝缘拉杆下部与金属拉杆的螺纹连接处弹簧退丝情况

从图 4 和图 5 可以看出,两个断口的静主触头、屏蔽罩、动主触头、压气缸及绝缘喷嘴均存在明显的电弧烧灼痕迹。



图4 静主触头及屏蔽罩烧灼情况



图5 动主触头、压气缸及绝缘喷嘴烧灼情况

两个断口动弧触头的触指瓣明显胀大,被完全顶松,静弧触头插入后两者不能紧密接触,具体情况如图 6 所示。此外,由主触头接触痕迹可得,两个断

口动静触头的对中性良好。



图6 动弧触头瓣明显胀大情况

4 故障原因分析

桥棉线 261 断路器 B 相绝缘拉杆与金属拉杆间是靠螺纹来传递操作动力的。但是,由于存在绝缘拉杆无定位销、粘接材料老化的缺陷,绝缘拉杆在断路器操作过程中受到相当大的冲击力,造成粘接破坏而出现拉杆松动,绝缘拉杆下部与金属拉杆的螺纹连接处出现退丝现象。退丝过程随着操作的次数增加而不断累积,特别是液压机构在操作的时候,其活塞往往存在着一定的转动,从而加剧了拉杆的退丝过程。

桥棉线 261 断路器的绝缘拉杆与金属拉杆仅采用螺纹连接,并未采取定位销等更加可靠的连接方式。断路器解体发现拉杆已经退丝一圈半左右,折合拉杆竖直方向的移动距离为 20 mm,相当于绝缘拉杆被加长,同时螺纹连接处的粘接材料硬化脱落。合闸时绝缘拉杆带动动触头向上伸,使得断路器的开距减小,接触行程增大。随着接触行程的加大,导致静弧触头插入动弧触头的深度增加。当接触行程增加 12 mm 以上时,静弧触头就会顶到动弧触头的根部,动弧触头的触指瓣被明显胀大且完全顶松,导致静弧触头与动弧触头实际接触不可靠,造成分闸时弧触头先分离,主触头后于弧触头分离,电弧电流始终流过主触头而无法熄弧。由于故障电流无法切除,继而引起 220 kV 1 号母差失灵保护和安控先后动作,事故发生。

5 防范措施

目前,LW6-220 型断路器绝缘拉杆松动问题

(下转第 94 页)

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¹, 龚成明², 何 锐¹, 朱丽嫚³, 高 剑¹, 孙世明²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;
3. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘 要:简要分析了变电站集中监控功能对智能电网调度控制系统的要求和传统主要面向调度员设计的调控系统存在的不足,提出了为更好地满足正常监控、事故和异常处理以及专业管理的需求而进行的几项改进。各项改进在大型调控中心应用后显著提升了变电站集中监控业务的效率。
关键词:智能电网调度控制系统;变电站集中监控
中图分类号:TM711 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)05-0076-04

Several Improvements on Centralized Monitoring and Control Functions for Substation in Dispatching and Control System of Smart Grid

Li Yi¹, Gong Chengming², He Rui¹, Zhu Liman³, Gao Jian¹, Sun Shiming²
(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. NARI Technology Development Co., Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu, China;
3. State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Firstly, the requirements of centralized monitoring and control functions in substation are briefly analyzed as well as the deficiency of the existing implementations which are mainly designed for dispatchers. Then, several improvements are proposed for a better support of the monitoring and control under normal situations and the alarming under outages or abnormal situations. These improvements have been deployed in large-scale dispatching and control centers, which improves the efficiency of centralized monitoring and control in substation.
Key words: dispatching and control system of smart grid; centralized monitoring and control in substation

0 引 言

变电站集中监控业务是电网公司实现集约化运行的重要方面,既是管理方面的重要变革,同时也对调控系统支撑能力提出了新的更高要求^[1-2]。部署于调控中心的自动化系统传统上主要面向调度员服务,在保证数据及时、准确的基础上主要提供辅助调度员进行保障电网安全稳定和经济运行的各类分析、控制和辅助决策等功能。随着变电站无人值班改造,在实施变电站集中监控业务后,调控中心的监控员承担着设备监视和操作、故障判断、分析总结等多种类型的运行和管理任务,监控员面临着不同于

调度员的压力:在电网正常工况下要确保信号巡检完全覆盖;在电网事故情况下要处理大量突发信号并准确分辨信号产生原因。在典型的省级和大型地区级调控中心,监控员监视的信号点数在十万以上乃至百万级的规模,监控员需要关注每一个信号的动作、复归、异常等各类状态并据此对变电站的运行情况作出判断。如果由于缺少对这些信号进行有效分析的自动化辅助手段,将会制约集中监控业务的范围,同时也会给电网的安全运行带来隐患。

国家电网公司近年来在推进变电站集中监控业务方面取得了显著的成效,在相应的技术支持系统方面也提出了明确的规范^[3-4],智能电网调度控制系统的相关综合智能告警和变电站集中监控功能也

发挥了重大作用^[5-7]。但随着监控业务的快速发展,智能电网调度控制系统的功能在满足变电站集中监控业务需求方面仍存在一些短板,在告警信号的优化和再加工以及信号辅助分析等方面的不足尤为突出。

针对集中监控业务的特点提出了对调控系统集中监控功能所进行的多项实用化改进,包括:1)在电网正常状态下对监控信号的优化,对监控员巡视轨迹的记录与分析以及监控信号的自动巡检与分析;2)在电网事故或异常情况下对告警信号和告警方式的优化;3)对监控专业管理和分析评价的辅助支撑等。这些实用化功能已应用于多个省级和地区调控中心,显著提升了变电站集控监控工作的效率,为调控“大运行”工作提供了有力的支撑。

1 集中监控业务的特点和对调控系统的要求

实施调控集约化运行后,虽然调度员和监控员集中在共同的场所值班,并且一般也使用同一平台上相同的SCADA功能,但是变电站集中监控业务和调度大厅内传统的调度业务有着显著的差别。不同于调度员侧重关注系统发用平衡及系统安全稳定状态,监控员更多地关注变电站现场所有一、二次设备的运行状态。集中监控业务要求监控员能通过对信号以及主要遥测量的监视准确反演出现场实际的设备状态,而且能对故障情况下大量的信号进行分析从而对实际发生的故障做出准确判断,并能够根据调度员的指令或监控自身的职责快捷进行各类操作。

基于上述集中监控业务的特点,一方面变电站现场自动化系统上送的信号要全面,确保不遗漏任何和设备状态相关的信号;另一方面,主站端的信号处理要高效,尽可能为监控员提供简洁有效的结果。只有达到这两方面的要求才可能提高监控业务的效率,使得集中监控规模足够大,真正达到发挥集约化的优势。在信号的全面和展示结果的精简方面进行良好的平衡是调控系统变电站集中监控功能重要的出发点。所做的工作就是基于这一出发点开展的。

2 正常状态下的信号监视与分析优化

在电网正常状态下,每值监控员需要完成若干

幅画面的巡视,并确认本值内状态发生变化的信号。要确保一些个别的信号不被大量的其他信号淹没,否则就有可能失去对变电站重要事件的了解和把握,进而可能导致事件进一步发展甚至危害主网的安全。为实现对正常状态下信号的有效监视需要对分散的原始信号进行优化分析并提供辅助手段来最大限度避免监控员的漏巡。

2.1 监控信号关联分析和自动派生

1) 关联信号分析

对于大量的分散信号,调控系统一般按照分级分类的要求对这些信号做了区别展示,但传统的简单按照原始的时间序列顺序来展示难免会出现个别重要信号淹没在大量其他信号中的情形。只有按照事件、厂站等属性对信号进行有效关联,才可避免监控员迷失在离散的信号中。例如,某条线路跳闸事件产生的信号可能分散在多个地方并且和其他变电站的各类信号混杂在一起。

通过对设备告警信号的类型、所属厂站和间隔以及发生时间等属性进行相关性分析,结合设备故障后关联告警模板,实现了在设备发生故障情况下从实时告警窗中自动关联提取相关的一组告警信息,并支持对历史告警信息进行关联性分析。

图1是关联信号提取方法示例图,例如对于线路跳闸事故告警信息,可以查询其发生前后几分钟的相关类型告警信息,以便快速分析排除检修情况。

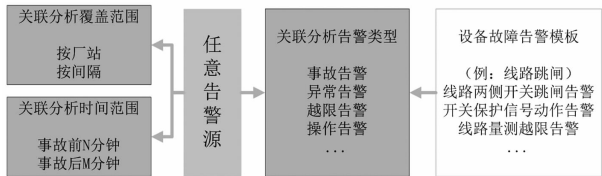


图1 关联信号提取方法

2) 重要告警信号派生

监视对象的某些重要状态有可能缺少站端直接发送的信号,监控员这种情形往往难以及时发现和处置。例如,母线等重要设备失压是重要的事件,但是一般只能由监控员基于量测值人工判断,时效性很难达到要求。

通过设置适当的失压判据,实现了在一定的时延范围内,结合设备的实时遥信和遥测信息,自动判断主变压器、母线等设备失压和全站失压,并及时发出母线或全站失压告警信号,不再需要监控员逐个厂站巡视并仔细判断才能识别出失压这一重要的事

件。图2是母线及全站失压判定逻辑图,当母线三相电压同时归零且母线失电,则判定当前母线失压。当全站所有母线均处于失压状态,则判定全站失压。

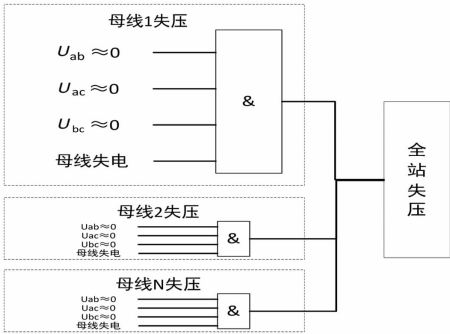


图2 母线及全站失压逻辑

2.2 监控画面游览轨迹记录与分析

人工对所有预定义的画面进行游览是监控员基本例行工作和安全保底手段。随着监控范围的扩大以及同时需要处理各类突发工作,可能会出现漏巡的情况,成为系统安全的一个隐患。

通过预定义每值监控员需要游览的画面以及游览频度要求,自动记录监控员实际画面游览轨迹,并将两者进行对比,实现了未游览画面的自动告警功能,实时提醒当值监控员。还支持在事后对所有画面游览轨迹及未及时游览的告警信息进行分析,实现对监控工作流程和特定监控员工作习惯进行评价。

2.3 监控信号变化和差异分析

监控员在交接班时需要快速准确地把握过去一段时间内信号变化情况以及后续需要继续关注的信号,靠交班和接班监控员手动翻阅告警记录来达到这一目的,工作量巨大且容易发生遗漏。

采用版本管理的思想,以某一时刻的数据断面为基础,建立各时刻断面巡视数据版本,再通过版本管理机制记录各版本在对应时刻的数据变化并进行管理。将包含相关信号状态的断面信息打包固化存储,通过对不同断面的对比,按照新增、消失、变化3类列出相关时刻信号状态变化列表,监控员在交接班时只需要关注所给出的变化信息即可。图3是断面数据结构定义和某一交接班分析结果示例。

具体实现时,这一功能既支持监控员在登录和注销时自动保存快照,也可以由监控员在任意时刻手动保存快照。通过用不同的颜色标注出新增、变化以及消失的信号,系统中所有监视对象的重要信

息变得一目了然。



图3 监控信号变化分析结果示例

3 事故或异常状态下的信号和告警优化

3.1 异常频发信号的检测和展示优化

对于因变电站端自动化装置异常引起的大量频发信号,需要在调控系统中有效地检测并在展示时用适当的方式进行隐藏,避免干扰监控员的正常工作。

基于对异常频发信号重复特征的分析,设计了相应的检测功能并在告警窗上对这类异常信号的展示自动进行折叠。图4为频发信号检测判断原理图,将在相对的滑动时间窗口 Δt 范围内统计是否发生频发信号。

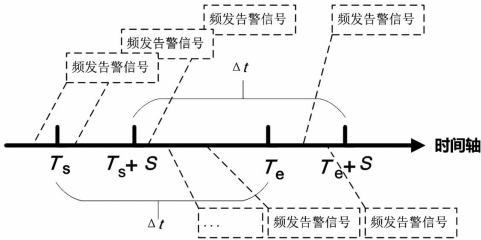


图4 频发信号检测原理

其中时间轴是一个滑动时间窗口,即给定时间窗口宽度 Δt 和窗口滑动步长 S ,频发信号检测时以当前窗口起始告警时间为 T_s ,结束告警时间为 T_e ,则 $T_e - T_s = \Delta t$,窗口滑动一个步长 S 后,新窗口起始告警和结束告警时间分别为 $T_s + S$ 和 $T_e + S$ 。在滑动窗口时间内统计异常频发信号并自动折叠,对于折叠的异常频发信号,监控员在需要时也可以展开进行必要的确认和详细分析。

3.2 突发事件大量推画面的优化

当电网发生事故时,将在很短时间内产生大量的信号,并可能同时触发语音、自动推画面等多种告警方式。对于这些大量的突发信号,需要进行有效处置,既保障监控员及时得到重要的信息,又要避免

大量告警干扰监控员对事件的处置,还要注意减轻大量突发信号引起的系统过重的负担。

针对异常或事故情况下触发的突发大量推画面告警方式,设计并实现了先推出事故厂站画面列表的展现方式,具体展示哪一幅画面由监控员根据需要选择。这样在发生异常或事故时,将避免大量画面直接堆叠在界面上,影响监控员快速选择最关心的画面,也可避免同一时间推出大量画面引起工作站和相关服务器的资源占用急剧升高。

4 监控专业管理与分析评价的辅助支撑

变电站集中监控除实时业务外,还有大量的管理类工作。一方面,需要基于历史数据对变电站一、二次设备的运行情况进行分析;另一方面,也需要对相关的信息进行分析以对监控员的工作进行评价和指导。调控系统一般都自动保存了完整的历史数据,但是在原有系统上对历史数据进行分析时,发现存在以下 3 个主要的问题:一是告警历史信息中缺少部分集中监控业务所需要的重要属性,无法对告警信息进行深度分析;二是相关信息分散在不同的业务系统中,缺乏对相关信息进行有效融合和关联分析;三是典型信号的处理经验没有得到很好的推广。为了提高监控专业管理的技术支撑水平,进行了 3 个方面的改进。

4.1 设备操作标识与精细化分析

开关变位的原因包括跳闸、检修、计划停运、合解环、调压等若干类型。为了结合设备远方操作精细化分析开关变位原因,基于告警信息字符串结构化解析和逻辑分析实现了对设备操作类型分析,能够自动识别远方操作、检修、调压等操作类型,并支持人工对个别信号的操作类型进行调整和增加备注信息。基于更加细化和准确的操作原因分类,设备监控管理专业可以快捷地得到一、二次设备运行状态和监控操作的深入分析结果。图 5 是设备操作分析数据流程图,变位信号经过分析后自动判别出了检修、频发、遥控原因,对于不能自动判别出正常、操作等原因的信号可支持人工标记。

4.2 基于大数据分析的信息融合和关联分析评价

基于大数据平台技术,对监控数据进行分布式整合计算,把多个应用监控数据孤立的节点信息,对其进行有效的关联分析。

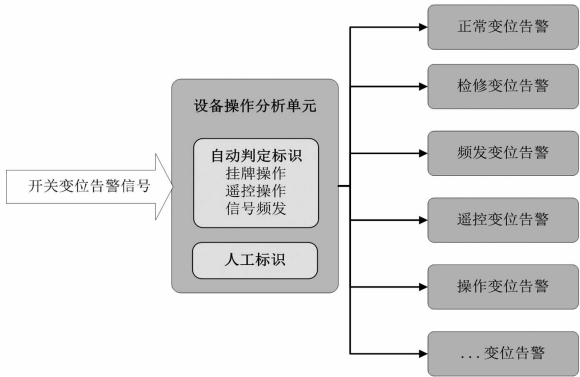


图 5 设备操作原因分类和标识

首先,构建监控大数据对象统一编码 ID,对象包括一次设备、二次设备、运行、辅助类数据等,为保证监控数据对象在整个基于监控数据的变电站设备大数据分析系统中全局唯一,设计一套用于数据交互共享的编码规则(即 ID 编码规则),作为监控数据对象的唯一标识。编码原理如图 6 所示。

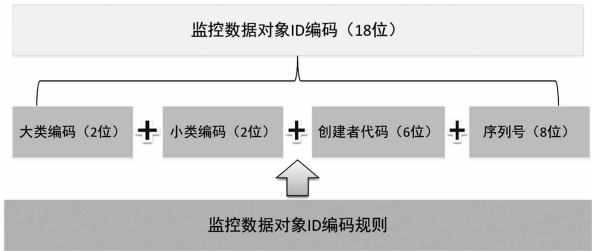


图 6 监控数据对象 ID 编码结构

其次,对集中监控变电站大数据统一整合建模,采取以监控设备为中心,强化监控数据与设备之间的关联关系。统一用设备 ID 为关联字段,将监控设备的运行数据与管理数据及其他辅助数据进行关联整合,形成关联数据集并存储于数据中心。监控大数据统一建模示意图如图 7 所示。

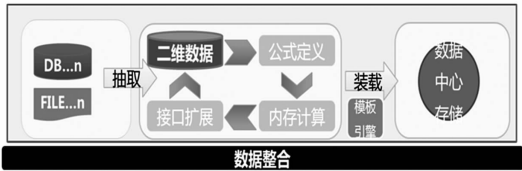


图 7 监控大数据统一整合建模

最后,基于分布式文件系统(Hadoop distributed file system,HDFS)实现监控大数据分析应用,对事件和监控员的操作进行关联分析评价。这一功能首先抽取分散的各类事件信息,并将这些事件和监控员的操作记录相关联,然后将抽取和关联的结果同

(下转第 90 页)

基于重大活动保供电的多级联合调控管理模式探索

杨 翔¹,刘 剑¹,李 祥¹,时 锐²,李 甘³

(1. 国网杭州供电公司,浙江 杭州 310009;2. 全球能源互联网集团有限公司,北京 100031;
3. 国网四川省电力公司,四川 成都 610041)

摘 要:随着中国经济的不断发展,国际影响力日益增强,影响较大、意义较重的世界级别政治、文化、体育等活动持续开展,对电网特别是重点区域电网的保障供电服务的要求愈发增加。为了全面满足保障用户供电质量和应急响应速度的极高要求,常规的省、地、县三级调控分级管理模式已经略显乏力,亟需多级联合调控管理模式。通过优化调控业务流程,整合各级调控机构的技术和人力资源,提出“省-地-县”三级调控联动机制,建立基于重大活动保供电的多级联合调控管理体系,实现对保电用户优质供电和电网运行调度快速响应。该体系已在 G20 杭州峰会、第十三届学生运动会等重大活动的保供电工作中得到验证。

关键词:保供电;调控管理;多级联合调控;快速响应

中图分类号:TM732 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)05-0080-06

Multi – level Coordinated Dispatching
Management Based on Power Guarantee of Significant Activities

Yang Xuan¹,Liu Jian¹,Li Xiang¹,Shi Rui²,Li Gan³

(1. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310009, Zhejiang, China;
2. Global Energy Interconnection Corporation, Beijing 100031, China;
3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:With the development of economy, the influence of China is growing sharply, and the world – class political, cultural and sport activities are carried out in China frequently, which leads to more strict requirement of power guarantee. In order to satisfy these requirements, a novel multi – level coordinated dispatching pattern is proposed based on power guarantee of significant activities through process optimization, integration of technology and human resources and multi – level joint dispatching. This novel pattern is able to guarantee the good power supply and quick response. The proposed pattern is verified by G20 summit and the thirteenth session of the student sports meeting.

Key words:power guarantee; dispatching and control; multi – level coordinated dispatching; quick response

随着中国国际地位的提高,中国不断参与国际事务并发挥重要作用,近年来先后成功举办了奥运会、世博会、APEC 峰会、亚信峰会、G20 峰会等具有重大影响力的国际盛会,2017 年也有“一带一路高峰论坛”、“金砖五国”峰会等多场重要的主场外交活动。以特高压电网和智能电网技术大范围应用为特点的中国电网作为上述重大政治活动电力保障的执行主体,肩负着为活动提供清洁能源、可靠供电、优质服务的重要使命,做好电力保障工作是一项重大的政治任务,关乎国家的形象,关系电网的声

誉^[1-3]。

重大活动的保供电工作要求严格,环境复杂,存在保电点多面广、设备差异性大、重要场馆安保特殊等诸多难点^[4-6]。目前国内对调控方向的供电保障和应急处置的研究主要集中在两方面:一方面是新技术和新系统的开发研制^[7-10];另一方面是调控业务流程的完善优化^[11-14],缺乏组织模式的开拓创新。

为圆满完成电力保障工作,确保保供电期间的调控业务高效开展,需要改变省、地、县调度分级管理的常规调度模式,创新性地实施省、地、县多级联

合调控管理体系。

下面提出的多级联合调控管理体系在管理方法层面,通过优化省、地、县三级调控业务流程,成立重大活动保电现场调控场所,建立省、地、县三级调控联动响应机制,实现三级调度联合调控业务顺利开展。

在管理技术层面,将省调 D5000、地调自动化系统、配网自动化系统、营销用户系统进行整合,实现省公司 500 kV 电网、市公司 220 kV、110 kV 电网、配电 10 kV 电网以及用户内部运行信息的三级调度共享。

在体系保障层面,通过对省调、地调、现场调度场所的技术改造,使之具备三级调度联合值班条件,同时通过视频电话会议系统,与省调、配(县)调实现电网信息的实时互联互通。

1 多级联合调控管理模式的管理目标

国家电网公司对重大活动的保供电目标为“四个零”,即“设备零故障、客户零闪动、工作零差错、服务零投诉”。所提出的多级联合调控管理体系从以下几个方面加强调控一线管理工作,实现保供电目标:

一是强化调度掌控能力,提升电网运行水平,及时发现电网及用户的设备异常状况,优化设备异常及事故的调度处理流程,缩短调度响应处置时间,保障电网安全可靠运行,实现“设备零故障”;二是完善电网结构布局,合理安排运行方式,尽可能减少保电期间的设备操作,减少电网运行风险,实现“客户零闪动”;三是制定调度应急预案,修订业务流程规范,保证调控管理工作制度、标准先行,细化多级联合调控管理体系中的人员职责,强化保电期间调控工作标准,实现“工作零差错”;四是设立保电现场调度,签订临时调度协议,建立用户-营销-调度的信息反馈机制,及时了解用户侧的用电情况,尽早发现重要场馆供电隐患,确保用户电能质量在合格范围,实现用户“服务零投诉”。

2 多级联合调控管理模式的组织架构

2.1 人员组织保障

为确保保供电期间省、地、县多级联合调控管理体系下调控业务的有序开展,分别在省调调控中心、

地调调控中心、现场调控中心设置三级调度协同值班,并对协同值班场所的指挥体系架构、岗位设置与职责分工、应急处置、指令下达、信息报送等各方面进行了明确。

1)省调调控中心:除省调调控员外还加入了杭州地调调控员,地调调控员主要负责做好省调与杭调在突发情况时的沟通协调工作。

2)地调调控中心:成员除地调调控员外还加入了省调及市区配调调控员,负责全面掌控保电期间杭州电网的运行情况,负责所辖电网及设备的调控运行,事故、异常处理及设备集中监视、无功电压调节等工作。

3)现场调控中心:成员包括了省调、地调、县调调控员,实行省、地、县三级调度联合值班,调度范围为向保电场馆供电的各 110 kV 变电站及相应 10 kV/20 kV 专线线路,负责全面掌控重大活动期间保电区域 110 kV 以下电网及用户高配设备的调控运行,事故、异常处理,设备集中监视、无功电压调节等工作。

2.2 值班体系保障

多级联合调控管理体系的核心是地区调控机构,其指挥枢纽也设置在地区调控中心,承担着承上启下的连接作用。所以地区调控机构应加强值班力量,采用班组长和专业工程师 24 h 轮岗带班。为更全面掌控保电期间上级电网、市区配电网以及用户侧的运行情况,地区调控中心增设省、配两级调度保电专席和营销协调席,与地调调度员、监控员在同一大厅内联合值班,并通过视频电话会议系统,与省调、配(县)调实现电网信息的实时互联互通。

以杭州电网重要活动的保供电工作为例,在杭调 D5000 和 DF8002/8003 的基础上,地调大厅增设自动化支持席,并同步接入调度保电技术支持系统、省调 D5000、配调图形系统、配电自动化 OPEN3200 等多套技术支持系统,有力支撑省、地、配三级调度协同运作,实现了从 500 kV 到 0.4 kV 电网运行情况的统筹分析和电网风险的综合预控。具体地调调度大厅布置见图 1。

3 多级联合调控管理模式的主要做法

3.1 调控阵线前移

在重大活动的保电期间,多级联合调控管理体系将调控阵线前移,在重要保电场馆附近设立现场

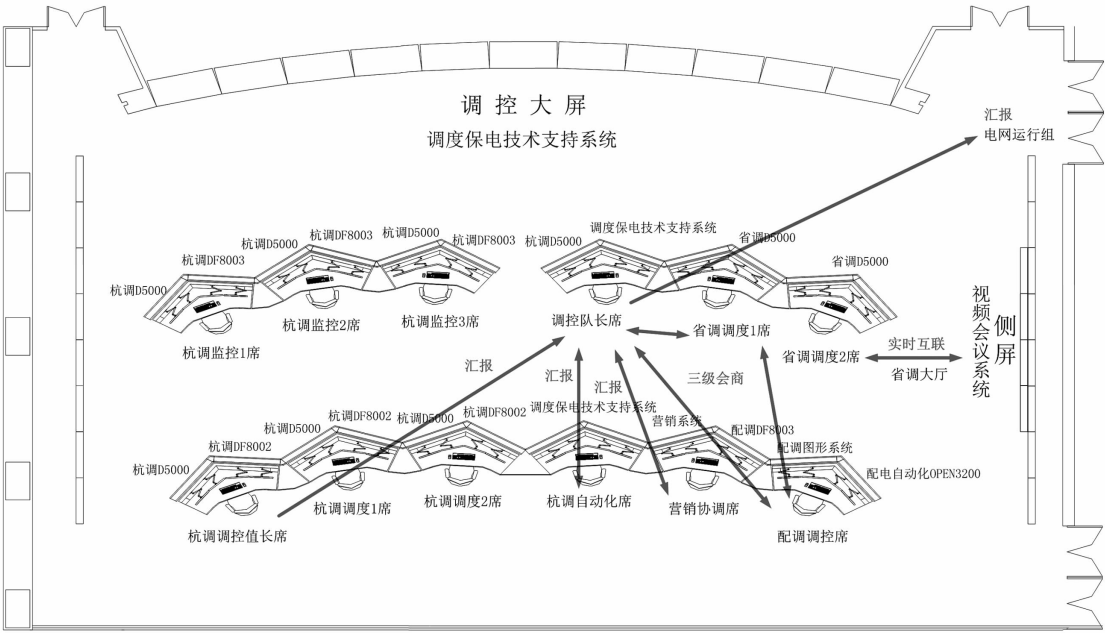


图 1 多级联合调控体系下的地区调控大厅布置

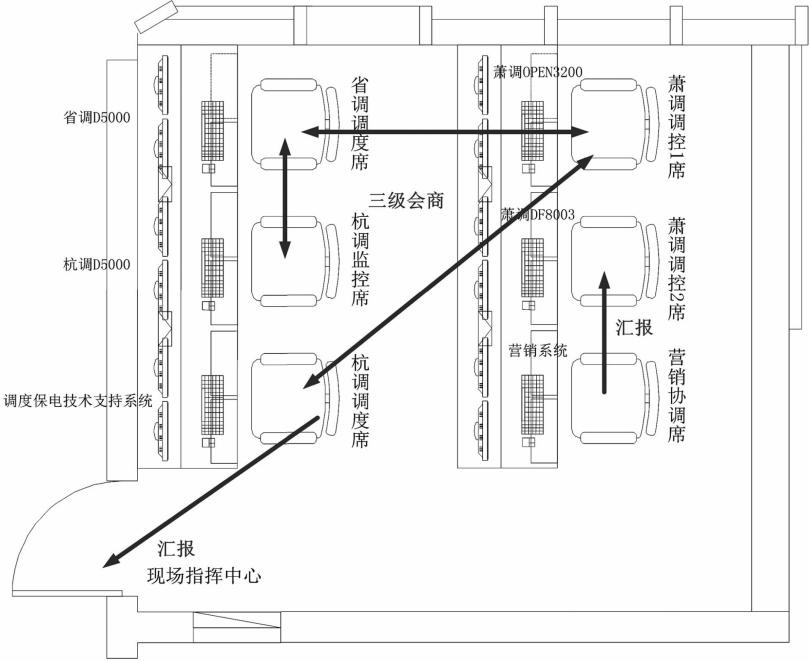


图 2 G20 峰会期间现场调控中心调度席位及技术支持系统布置

调控中心,成立现场调度小组,由省、地、县三级调度派驻现场联合值班,负责向重要场馆供电的各座 110 kV 变电站及用户高配的调控运行工作。

在现场调控中心,各级调控自动化系统集成布置,供值班人员完成调控运行工作。以 G20 峰会保供电期间为例,浙江省调 D5000 系统,杭州地调 D5000 系统、东方 8003 系统,萧山区调 8003 系统、Open3200 系统、调度保电技术支持系统以及协同营销系统全部布置于峰会主场馆附近的现场调控中心

内,供现场调控组集中监视主场馆及上级电源设备的运行状况,并进行主配电网至主场馆用户高、低配电网信息的集中分析、现场会商,实现快速发现并消除缺陷隐患,简化流程,缩短距离,切实有力保障峰会期间主场馆电压“零闪动”。具体现场调度大厅布置见图 2。

3.2 对接保电用户

为落实国家电网公司“你用电,我用心”的企业理念,更好服务于保电用户,多级联合调控管理体系

主动介入,除了将调度前移,在重要活动场馆附近设立现场调控中心外,还积极与营销部门和重要用户对接,组织开展用户高配值班人员调控专业培训,对特级保电用户和特别重要的一级用户,应用户对供电可靠性和电能质量的高标准要求,签订保电期间临时调度协议,将调控规范化管理延伸至用户。

所有重要保电用户内部供电信息全部接入调度保电技术支持系统,与入驻调控大厅的营销协调专席及时沟通,并结合营销系统,实现对用户高低配运行情况的全面掌控。配电网生产抢修指挥平台与市政服务多平台信息联动,快速响应,便捷市民。抢修指挥专业积极与客服中心接洽,开通重要活动抢修信息专用联络通道,及时报送电网信息,通过 95598 服务热线向客户解释反馈,用心服务“零投诉”。

3.3 构建联合调控

多级联合调控管理体系改变了分级调度的管理模式,在大型重要保供电任务中通过联合调度,构建信息共享、处置会商、统一决策的三级联合调度防线,建立调控业务处理的快速响应联动机制,强化各级调控业务联系的紧密度,实现调控业务的高度整合和顺畅沟通,确保电网异常及缺陷情况的及时发现和快速处置。多级联合调控管理体系在电网异常缺陷处置、设备状态调整、保电用户等级调整和此次杭州电网负荷大幅下降的无功电压管控中,发挥了协同作战的强大优势。

通过多级联合调控管理体系的建立,显著提升了设备紧急缺陷消除、上下级调控机构联动配合和保电等级临时提升等调度快速响应和精准处置能力,极好满足了特殊保电时期“全网保核心”的前端场馆可靠供电需求为主要导向的指挥协调模式,在各司其职、各负其责的调度管辖基础上,集全网之力,最大限度、最高优先等级确保重要用户供电万无一失。

4 多级联合调控管理模式的工作流程

按照电网公司保供电应急方案统一部署要求,保供电期间,应急系统设置省、地、县三级指挥中心,保供电范围内发生任何设备故障、突发事件,均要求第一时间汇报现场指挥中心及各级调度,由指挥中心负责向上级指挥中心和专业管理人员汇报。

指挥中心的调控运行组负责保电相关电网运行常规业务的指挥和协调;负责提出保电电网突发事

件处置建议;负责对接省公司、市公司、县公司调控中心。当发生涉及重大活动保电的电网异常、危急缺陷、设备故障时,调控运行组应立即将相关情况汇报指挥中心。

保电期间,电网或设备发生异常情况时,运维人员应按照正常业务流程汇报相关调控人员,并接受调度指挥进行事故处理,调度业务运作流程较平时保持不变。流程分为事件发生、事件分析、事件处置和总结归档 4 个阶段,多级联合调控管理体系的工作流程如图 3 所示。

1) 事件发生

①值班监控员(调控员)通过调度自动化、配电自动化等技术支持系统发现事故告警信息或运维人员通过现场巡视发现设备出现异常。

②调控带班队长或运维驻守队长立即将相关电网或设备异常信息汇报保电指挥部。

2) 事件分析

①相关调度立即将相关电网或设备异常信息通知运维人员。

②运维人员对相关设备或线路进行检查,并详细记录现场情况。

③省地县三级调度根据电网或设备信息开展会商,综合分析判断故障,并汇报保电指挥部。

④保电指挥部根据电网运行信息综合研判,制定应急处置方案。

3) 事件处置

①省地县三级调度联动,根据调控范围落实处置方案。

②运维人员根据调度指令,落实安全措施,检修人员开展事故抢修。

③现场事故处理完毕,运维人员终结工作,并汇报相应调度。

4) 总结归档

①事故处理工作结束,调度、运维人员根据处置方案复役相关设备。

②调度、运维人员将处置结果汇报保电指挥部。

③各级调度编撰事故报告,进行事故分析。

④相关资料归档。

5 多级联合调控管理模式的应用实例

所提出的多级联合调控管理体系应用于 G20

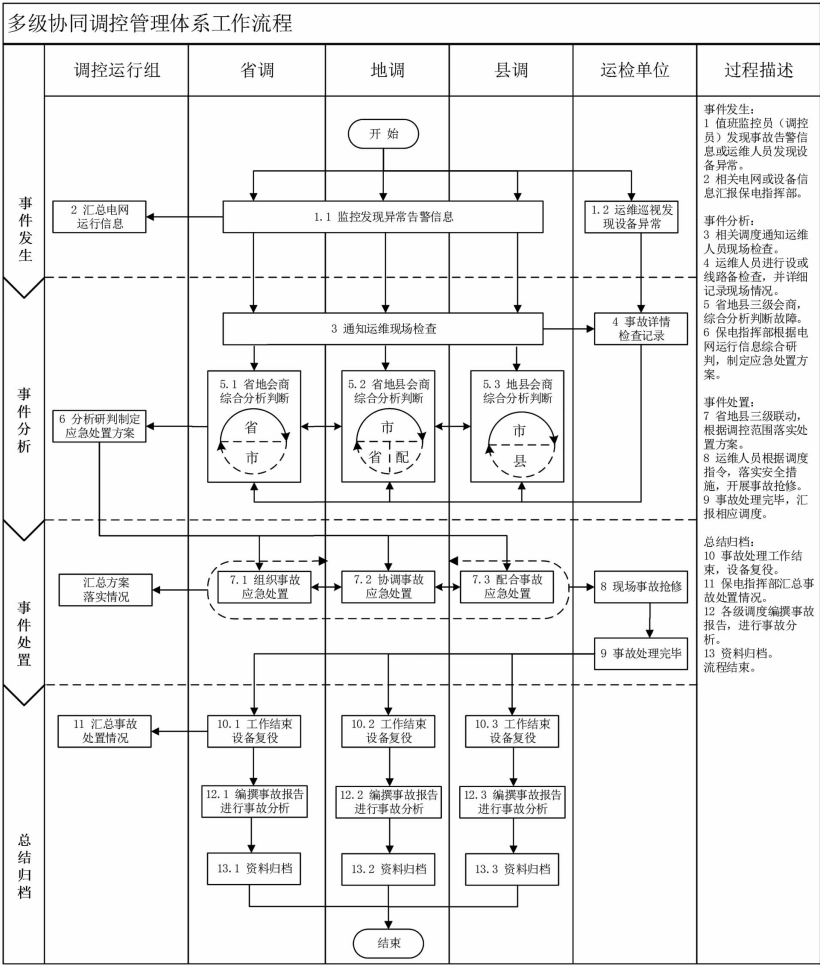


图 3 多级联合调控管理体系工作流程

杭州峰会保供电工作,在峰会期间取得以下几项成果应用。

5.1 重要活动保电期间的联合调压

重要活动期间负荷容易偏轻,例如 G20 杭州峰会期间负荷降至峰会前常规负荷水平的 1/3,系统电压水平呈现整体上升趋势。省地两级调度紧急会商后作出控制方案,紧急投入预留的电抗器,同时省调利用所有系统资源协助杭州公司进行系统调压。

在主网 220 kV 电压稳定的基础上,电网运行组严密监控各变电站母线电压走势,综合研判,根据负荷变化及时调整变电站变压器有载挡位,确保电压水平控制在合格中间偏低水平。同时在特级活动开始前 1 h 将各直接供电的 10 kV/20 kV 母线电压预调到位,在特级活动期间变电站不安排任何操作,在减少电网操作风险同时,确保了电能质量。通过省、地、县三级调度联动,峰会保电期间杭州 220 kV 主网及 10 kV/20 kV 配电网电压运行平稳,重要保电区域和重要保电场馆的母线电压均控制在合格范围

的中间位置,满足保电用户的电压要求。

5.2 保电升级

由于重要活动电力保障需要,需紧急增加保电用户。接到保电指挥部的相关要求后,电网运行组立即统一部署,多级联合调控管理体系充分发挥联合值班优势,根据各自调度范围,分别运用在杭州地调大厅配置的配调图形系统、杭调 DF8002、省调 D5000 等技术支持系统,对相关重要用户的供电电源从 10 kV 到 220 kV 进行追溯。经过合理分工、有效协作,在很短时间内完成了保电用户供电路径及保电设备的梳理,为下一步保障方案的制定及值守人员的调配赢得了时间。

5.3 缺陷处理

重要活动保供电期间,某电缆终端漏油,现场运维要求紧急拉停线路进行处理,杭调值班员在接到汇报后,立即汇报联合值班的省调和配调调度员,三级调度紧急协商,综合研判,形成最优处置方案。多级联合调控管理体系打破电压等级对调度的限制,

避免了因多次电话联系导致的信息失真风险和战机延误问题,同时有效梳理主配电网电网信息,切实提高了应急处置的可靠性和及时性。

6 结 语

多级联合调控管理体系适用于各地、县公司开展大型重要活动的调度保供电工作,特别是对于保电场馆多、保电范围大的场合。调度业务前移,建立现场保电指挥中心模式,适用于大型重要保供电活动中活动主会场保电工作。

在大型重要活动保电期间,应用多级联合调控管理体系,开展省、地、县三级调度联合值班,构建信息共享、处置会商、统一决策的三级联合调度防线,能有效提高保电期间调度应对保电时期突发电网事件、设备紧急缺陷、保电临时升级、电网电压异常调整等工作的信息交互和快速响应能力,通过联合调度,最大限度、最高优先等级确保重要用户供电万无一失。

参考文献

[1] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
[2] 刘振亚. 智能电网技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
[3] 刘振亚. 中国电力与能源 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

(上接第 55 页)

$$T_j = \Delta U_f \cdot M + T_{j0} = -200\Delta U_f + 531.04 \quad (5)$$

由式(5)可以通过功率晶闸管的通态压降得出该状态下的稳态结温。

4 结 语

对待测功率晶闸管的热敏特性进行研究,通过设计的试验平台对其热敏性能进行了测试,并绘制出试品在 20 A 恒定电流时的热敏特性曲线,拟合出功率晶闸管温度与通态压降的表达式。获得的实验趋势与理论一致,为后期测量功率晶闸管通态压降获得其暂态结温打下基础。

在后续研究中将通过搭建更大容量的实验平台,来测定实际工程中额定工况下的温敏曲线。以此获得运行中功率晶闸管的结温,进而达到监测功率晶闸管运行状态的目的。

参考文献

[1] 丁荣军, 刘国友. ±1100 kV 特高压直流输电用 6 英寸

[4] 曹国卫. 加强重大活动保供电工作的思考[J]. 电力需求侧管理, 2010, 12(3): 72-73.
[5] 彭选辉, 马兴龙, 莫宝律, 等. 浅析供电企业保供电工作的常态化管理[J]. 电力安全技术, 2015, 17(10): 6-9.
[6] 田新利. 大型发电公司保电期间应急处置基本原则与程序探讨[J]. 电力安全技术, 2010, 12(4): 6-8.
[7] 吴文传, 张伯明, 曹福成, 等. 电网应急指挥技术支持系统设计与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 1-6.
[8] 杜兆斌, 陈曾, 管霖, 等. 移动保供电电源储能电池优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 215-221.
[9] 陈晟. 电能质量与供电可靠性关系分析[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 99-103.
[10] 汤军, 张弛, 姜芸, 等. 世博供电保障管理系统的研究及应用[J]. 华东电力, 2011, 39(4): 584-587.
[11] 陈展纶, 王毅. 重点地区及用户保供电工作分类策略研究[J]. 贵州电力技术, 2017, 20(5): 58-63.
[12] 王红, 刘明峰, 刘明. 信息安全评估在青岛重大活动电力保障中的应用[J]. 电力信息化, 2009, 7(3): 32-36.
[13] 陈靓. 重大活动电力保障措施探讨[J]. 电力需求侧管理, 2014, 16(5): 51-54.
[14] 杨翺, 王坚俊, 楼华辉等. “三公”调度筑牢电力发展基石[J]. 中国电力企业管理, 2017(10): 84-85.

作者简介:

杨 翺(1987), 博士、高级工程师, 主要从事电力系统调度监控工作, 研究领域包括电网调控运行、电力系统状态估计、新能源接入及消纳管理等。

(收稿日期: 2018-05-09)

晶闸管及其设计优化[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5180-5187.

[2] 胡永银, 李兴源, 李宽. 晶闸管结温计算方法综述[J]. 华东电力, 2013, 41(9): 1881-1886.
[3] 董汉彬. 功率晶闸管的暂态热特性研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
[4] 蓝元良, 汤广福, 印永华, 等. 大功率晶闸管热阻抗分析方法的的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 1-6.
[5] 彭勇殿, 李世平, 黄建伟, 等. 高压直流输电系统故障电流下晶闸管的温升计算[J]. 交流技术与电力牵引, 2008(1): 20-23.
[6] 秦贤满. 电力半导体器件结温的计算和测试[J]. 电气应用, 1995(4): 22-24.
[7] 聂代祚. 电力半导体器件[M]. 北京: 电子工业出版社, 1994.
[8] W. 格尔拉赫著, 卞抗译. 晶闸管[M]. 北京: 机械工业出版社, 1976.

作者简介:

董汉彬(1987), 硕士、工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术。

(收稿日期: 2018-06-16)

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

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘 要:电力科研型企业主要从事电力运行、检修等专业技术支撑,以提高电网运行安全、解决生产现场技术难题为目标,以研究开发资金项目为依托,开展新技术研究、新标准编制等,其综合计划管理与一般供电公司存在较大差异。基于电力科研型企业的特点,探讨通过“三级管控”模式,提高投资计划完成率等指标,实现综合计划管理提升。

关键词:综合计划;三级管控;全过程管控;里程碑

中图分类号:F426 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)05-0086-05

Promotion in Comprehensive Project Management of Power Scientific Research Enterprises Based on Three-level Control Mode

Tang Jing,Zheng Kai,Zhang Ran

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

Abstract:Power scientific research enterprises are mainly engaged in power operation maintenance and other professional technical support. Relying on the research and development funds projects, they take improving the operation security of power grid and solving the technical problems on the production site as the goal to carry out new technology research and new standards preparation, etc. Their comprehensive project management is quite different from the general power supply companies. Based on the characteristics of power scientific research enterprises, how to improve the completion rate of investment plans and other indicators is discussed through the "three-level control mode" to achieve the promotion of comprehensive project management.

Key words:comprehensive project; three-level control; whole process management; milestone

0 引 言

电网企业的综合计划管理涵盖的内容较多,一般包括4个大类:1)发展投入类指标,主要涉及资金投入的项目,如电网基建、城市配网、生产技改、固定资产零星购置、生产大修、电网信息化投入、营销投入、研究开发、教育培训、管理咨询等;2)营业业绩类指标,主要涉及购电量、售电量、营业收入、可控费用、总利润、线损率等;3)供电服务类指标,主要涉及城市综合供电电压合格率及其供电可靠性、农网供电可靠率、农网综合供电电压合格率等;4)资产质量类指标,主要涉及总资产、资产负债率、电费

回收等^[1]。

电力科研企业的综合计划管理与供电公司存在较大差异:1)发展投入类指标方面,供电公司以电网基建、城市配网等电网投资为主,电力科研企业以研究开发等成本类投资为主;2)供电公司项目管理侧重于施工安全、质量、进度等,电力科研企业的生产技改、生产大修主要用于科研实验室建设和改造,科研项目实施管控也与基建项目存在较大差异;3)电力科研企业一般不涉及营业业绩、供电服务、资产质量等指标。下面将结合电力科研企业综合计划的特点,重点探讨如何通过“三级管控”模式,强化发展投入类指标的管理,从而实现综合计划管理提升。

1 综合计划管理存在的问题

电力科研企业的生产技改、生产大修项目主要用于科研实验室建设和改造,所涉及的设备改造过程复杂,实施进度控制难度大,配套设备、部件的供应周期长,其项目过程管控操作困难,投资资金完成偏差不易控制。同时,研究开发在综合计划总体资金中占比较大,项目实施过程与基建类项目完全不同,工程类项目管理模式对其不适用,其项目的完成进度管控、资金使用进度管理直接制约综合计划整体完成。基于上述原因,电力科研企业急需一套适应其项目实施特点的管理方式,推动项目实施过程管理,促进综合计划管理提升。

2 综合计划管理提升的目标

以确保上级综合计划指标为导向,以综合计划月分析、季考评为抓手,以综合计划全过程管控、指标刚性执行为核心,通过综合计划三级管控,突出计划统领作用,开展“资金进度+实施质量”的双重管控,明确项目管理重点,落实项目实施要求,推进实施进度,加强计划指标和项目执行全过程监测、分析和考评,着力提升综合计划支出入账月季度平衡水平和年度完成水平,进一步实现综合计划有序、协调和平稳执行,提升综合计划管理精益化水平。

3 基于“三级”管控模式的提升措施

3.1 “三级管控”的含义

“一级管控”即公司层面的综合计划管控,由综合计划归口管理部门负责下达综合计划阶段目标要求,明确计划执行管控里程碑,开展综合计划的执行过程管控,对项目管理部门实施监督和考核。

“二级管控”即项目管理部门层面的管控,在综合计划阶段目标要求基础上,由项目管理部门负责确定专项资金项目的完成目标和进度管控计划,开展专项资金项目的执行过程管控,对项目承担部门实施监督和考核。

“三级管控”即项目实施层面的管控,是项目承担部门按照项目管理部门确定的完成目标和进度管控计划,开展项目具体实施,并在部门内部形成过程

管理机制,保证项目顺利完成,对项目负责人、资金负责人、具体实施人员等实施监督和考核。

3.2 明确责任分工

1)综合计划的归口管理部门,负责开展“一级管控”,履行以下职责:负责统筹综合计划的项目储备;负责制定下一年度综合计划编制要求,汇总下一年度专项计划建议及计划调整建议,编制下一年度综合计划编制建议^[2];负责综合计划的分解下达,同时下达里程碑计划并明确阶段性目标和要求;负责实施综合计划全过程管控,对里程碑计划和阶段性目标的完成情况,进行分析、检查、监督和通报;负责组织、督促专项资金项目的管理;负责对项目管理层面的管控,进行检查、督促、通报、考核;负责对综合计划考核指标的完成情况进行考核,确保指标完成。

2)专业资金项目的管理部门,负责开展“二级管控”,履行以下职责:负责专业资金项目的全过程管控,包括电网基建、城市配网、生产技改、固定资产零星购置、生产大修、电网信息化投入、营销投入、研究开发、教育培训、管理咨询等专业资金项目^[3];负责组织专项资金项目的论证与储备;负责编制下一年度指标计划、专项资金项目计划建议及调整建议;负责配合计划归口部门完成综合计划的分解与下达;负责刚性执行综合计划下达的里程碑计划和阶段性目标、要求,组织、督促承担部门开展项目实施,确保综合计划下达考核指标的完成;负责制定符合项目管理特点要求、超前于里程碑时间节点的项目进度管控方案,开展项目全过程管控;负责专项资金项目执行情况的分析,编制相关分析材料。负责对项目承担部门,进行检查、督促,提出通报、考核意见。

3)专业资金项目的实施部门,负责“三级管控”,履行以下职责:负责提出专项资金项目储备需求,完成项目储备工作,配合储备项目审查、入储备库等工作;负责专项项目的实施管控,配合制定项目进度管控方案,确定项目负责人、资金负责人、具体实施人员等;负责制定内部项目实施管控机制,刚性执行进度管控计划,按时完成实施工作,确保项目顺利完成;负责配合项目管理部门,开展专项资金项目完成情况的分析;负责根据部门承担项目的完成情况,对项目负责人、资金负责人、具体实施人员等,进行内部检查、督促、考核。

3.3 明确管控目标

1) 投资计划完成偏差率

目标值及考评周期:目标值 0%,月通报、季度及年度考评。指标执行要求:负责二级管控的资金项目管理部门,一是加强对分管综合计划项目的过程管控,通过采购申请提报、合同签订及履约等关键环节,保证项目实际实施进度与形象进度匹配;二是建立与上级部门月季度指标跟踪上报机制,在每月 25 日前与上级对口专业部门就该项指标进行跟踪协调,掌握其要求,确保上级部门对综合计划累计形象进度完成值不低于要求的目标值。对未能完成的项目,应于上级部门通报后的当月及时完成情况梳理并提出整改措施及考评意见。

2) 投资计划、投资项目调整幅度

目标值及考评周期:目标值不大于 3%,年度考评。指标执行要求:负责三级管控的项目实施部门应切实履行项目实施管理主体责任,确保承担的项目按预算执行,不得调整。对于确需调整的,应在 8 月前向对口的项目管理部门报告并履行公司“三重一大”决策程序后,由计划归口部门统一行文报送上级管理部门。对出现调整的项目,相关项目管理部门应及时完成情况梳理并提出整改措施及考评意见。

3) 项目的过程管控情况

目标值及考评周期:物资及非物资采购申请 ERP 提报及时率目标值 100%,月通报、季度及年度考评。指标执行要求:负责二级管控的资金项目管理部门应按照上级下达的综合计划里程碑节点和公司年度物资采购批次计划安排要求,督促项目承担部门,及时在 ERP 系统提报物资及非物资采购申请,确保分管的综合计划月季度物资及非物资采购申请 ERP 提报及时率为 100%。对未能完成的项目,应于上级部门通报后的当月及时完成情况梳理并提出整改措施及考评意见。

4) 项目支出入账率

目标值及考评周期:目标值不低于 75%,月通报、年度考评。指标执行要求:负责二级管控的资金项目管理部门应按照省公司下达的投资计划月季度目标、院综合计划里程碑节点和财务支出入账管理等要求,加强项目过程监控,确保项目月季度累计支出入账目标的完成。对未能完成的项目,应于发展安监局(综合计划一级管控)组织通报后的当月及

时完成情况梳理并提出整改措施及考评意见。

3.4 项目里程碑精益编制与执行过程推演

综合计划项目里程碑关键节点主要包括项目物资招标采购(含物资合同签订及入账)、非物资招标采购(含非物资合同签订及入账)、项目实施(含项目开工、竣工、验收、结算、审计、关闭及归档等)、各季度支出入账资金计划等,同时按项目类别和特点,对关键节点进行了差异化设置。编制及推演原则如下:

1) 项目物资及非物资招标采购节点

采购内容及批次节点:应符合项目可研批复(项目建议书)、项目管理规定、院年度物资采购批次计划安排等。采购批次计划按照“赶早不赶晚”原则,选择不晚于国网四川省电力公司下达里程碑节点的最近批次,力争提前,不得延后。合同签订节点:纳入公开招标的,一般为 ERP 采购申请截止时间后的 3 个月。纳入省公司授权非招标采购的,一般为 ERP 采购申请截止时间后的 1 个月。合同履行节点:物资合同按照到货验收合格后一次性入账并按合同约定支付。

非物资合同按照均衡入账和工程量匹配原则,根据项目类别差异化制定支出入账节点和比例(备注:纳入公开招标的非物资合同资金阶段支付要求及比例应按照项目里程碑要求编制,并在省公司工程服务招标计划审查时固化在招标文件中)。原则上,除因工程量较小(合同签订后 3 个月左右完工)可验收合格后一次性入账的外,均须按对应工程量分阶段入账,以实现资金与项目工程量执行质效双提升。其中第一阶段在相应工程量验收合格后支出入账原则上不高于合同总金额的 30%。

2) 项目实施节点

按照上级综合计划管理要求,当年项目当年完工,当年资金,当年入账,不得跨年。资金项目管理部门根据项目类别和相关管理要求,细化制定项目实施节点,确保项目实施节点合规合理。

3) 季度支出入账资金计划节点

资金项目管理部门根据采购、合同、财务支付等节点和管理要求,组织编制分管资金项目各季度支出入账资金计划,避免出现第 4 季度集中支付的情况。各季度支出入账资金计划累计值原则上应与项目当年资金一致,支出入账计划包括无需招标采购的其他费用(如差旅费、会议费、个人培训费等)。

4)项目执行过程推演

资金项目管理部门根据编制的里程碑关键节点并充分考虑合同管理、财务管理(如月度现金提报、增值税专用发票开具等)、项目管理等要求,组织项目实施部门进行项目执行的精益推演,确保里程碑关键节点合理可控。

3.5 执行偏差分析和预警

以综合计划月分析、季考评为抓手,计划归口部门作为综合计划的一级管控,重点开展资金计划执行偏差的分析和预警。资金项目管理部门按照综合计划二级管控要求,重点开展项目里程碑执行偏差的分析和预警。通过“正向跟踪”和“逆向溯源”方式,掌握计划项目的进展状态,确保计划执行可控、在控。

1)资金计划执行偏差分析和预警

计划归口部门按照项目类别和项目承担部门,每月对综合计划项目当年资金月度累计 ERP 财务支出入账率(不含税)与当季里程碑目标值进行对比分析和通报排名。每季度对综合计划项目当年资金季度累计 ERP 财务支出入账率(不含税)与里程碑目标进行对比分析和通报考评。按照里程碑要求,各类综合计划项目季度累计支出入账完成率在目标值的 85% 以下(含),给出 I 级预警,下达书面整改通知书。由公司综合计划分管领导约谈项目管理部门及项目承担部门负责人,视情况考核。在目标值的 85% ~ 90% (含),给出 II 级预警,下达书面整改通知书。在目标值的 90% ~ 95% (含),给出 III 级预警,进行通报提醒。在目标值的 95% ~ 100% ,给出 IV 级预警,进行日常督促。详见表 1。

表 1 资金计划精益管控预警级别

序号	预警级别	定义	预警方式
1	IV 级	在目标值的 95% ~ 100%	进行日常督促
2	III 级	在目标值的 90% ~ 95% (含)	进行通报提醒
3	II 级	在目标值的 85% ~ 90% (含)	下达书面整改通知书
4	I 级	在目标值的 85% 以下(含)	下达书面整改通知书,由公司综合计划分管领导约谈项目管理部门及项目承担部门负责人,视情况考核

表 2 项目里程碑精益管控预警级别

序号	预警级别	定义	预警方式
1	蓝色	滞后里程碑达到 3 日以内	进行日常督促
2	黄色	滞后里程碑达到 3 日以上,5 日以内	进行通报提醒
3	橙色	滞后里程碑达到 5 日以上,7 日以内	下达书面整改通知书
4	红色	滞后里程碑超过 7 日及以上	下达书面整改通知书,由公司综合计划分管领导约谈项目管理部门及项目承担部门负责人,视情况考核

2)项目里程碑执行偏差的分析和预警

资金项目管理部门应按照项目里程碑计划,每月督促项目实施部门按时完成项目物资及非物资招标采购提报、合同签订及履约、竣工验收、结算审计、归档等关键项目进度,加强项目实际工程量的过程跟踪和管控,确保资金安全和项目可控、在控。对于项目进度滞后里程碑超过 7 日及以上的,给出红色预警,下达书面整改通知书。由公司综合计划分管领导约谈项目承担部门负责人,视情况考核。滞后里程碑达到 5 日以上,7 日以内的,给出橙色预警,下达书面整改通知书。滞后里程碑达到 3 日以上,5 日以内的,给出黄色预警,进行通报提醒。滞后里程碑达到 3 日以内的,给出蓝色预警,进行日常督促。详见表 2。

4 结 语

将综合计划中的发展投入指标作为管理提升的重点,结合电力科研企业综合计划的特点,创新探讨综合计划“三级管控”模式,从职责分工、目标确定、实施推演、偏差分析与预警等方面论述“三级管控”的实施方法,达到以下综合计划管理提升目标:

1)通过实施“三级管控”模式,进一步理清各级管理职责界面,明确管控目标和重点,逐步形成层级清晰、目标明确、重点突出的综合计划管理新格局。

2)通过精益化编制项目管控里程碑,提前推演实施关键节点,梳理风险点、制约因素,为细化分解支出入账率等管控目标,提供依据,提升综合计划实施过程管控能力。

3)以里程碑节点目标为抓手,以关键节点为重点,开展执行偏差分析和预警,提前制定预防和纠偏措施,杜绝Ⅰ级和红色预警,避免Ⅱ级和橙色预警,有效减少Ⅲ级、Ⅳ级和黄色、蓝色预警,最终实现投资计划完成零偏差,投资计划、投资项目零调整,支出入账率目标完成。

通过开展综合计划“三级管控”,某电力科研企业2017年度的项目支出完成率指标,同比提高约21.15%,首次位居该网省系统42家单位第1名,较2016年提高2名,提前完成上级下达年度支出入账目标要求。累计支出入账率季度平均值达到14.91%,综合计划管控指标和资金预算均衡性取得2010年实行综合计划管理以来最佳成效。固定资产投资完成

(上接第79页)

监控业务的标准流程进行对比,对监控员的操作进行分析评价,给出有针对性的改进意见。

5 应用效果

所提出的几项变电站集中监控功能实用化改进,已在四川省多个地区调控中心投入实际使用。相关改进工作显著提升了变电站集中监控工作的效率,确保了变电站集中监控功能的顺利实施并为更大范围的集中监控提供了足够的支撑。其中,成都地调属于省会级大型地调,集中监控厂站293座,实施监控功能改进后,每值监控员用于监控信号巡检的时间由3.5 h缩短为10 min,此外在事故应对和设备监控管理等方面的能力也由此得到显著提升。

6 结 语

变电站集中监控能够大幅提升电网运行的集约化水平,是电网调控业务发展的趋势,与此同时,它也给监控员带来了明显的压力和挑战。智能电网调度和控制系统不能拘泥于原有主要面向调度员的设计,而要充分理解集中监控业务的需求,在信号量完整和展示结果简洁这两个方面做到很好的平衡,才能真正给集中监控业务提供有效的支撑。所提出的几项实用化改进是这方面工作的一点尝试,经过初步实施能够明显体会到在对集中监控业务的特点和需求进行细致分析后,调控系统适当的改进能够显著提升对集中监控业务的支撑。后续将对监控业务

率达到94.66%,超过省公司平均值11.2个百分点。

参考文献

[1] 陈绍梅. 解析供电企业综合管理办法[J]. 现代经济信息, 2011(16): 36-38.

[2] 叶炯. 电力公司综合计划管理的难点与对策[J]. 中外企业家, 2011(20): 25-26.

[3] 余慧, 郑建国. 浅析基于综合计划管理的绩效考核管理[J]. 经营管理者, 2013(13): 19-20.

作者简介:

唐 静(1988), 硕士研究生、工程师, 主要从事综合计划、物资计划、资金项目管理工作。

(收稿日期: 2018-08-02)

的需求进一步分析研究, 结合专业管理的规范化和标准化, 继续提升监控数据分析水平, 为变电站集中监控业务提供更切实有效的支撑。

参考文献

[1] 赵家庆. 220 kV 无人值班变电站远方监控系统建设[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 78-80.

[2] 朱东升, 孙纯军, 陈飞. 500 kV 变电站远方集中监控系统方案探讨[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 126-129.

[3] 智能电网调度控制系统第4-1部分: 实时监控与预警类应用电网实时监控与智能告警: Q/GDW 1680. 41-2015[S], 2015.

[4] 地区智能电网调度控制系统应用功能规范: Q / GDW 1461-2014[S], 2014.

[5] 金芬兰, 王昊, 范广民, 等. 智能电网调度控制系统的变电站集中监控功能设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 241-247.

[6] 闪鑫, 戴则梅, 张哲, 等. 智能电网调度控制系统综合智能告警研究及应用[J]. 电力系统自动化, 2015(1): 65-72.

[7] 赵家庆, 唐胜, 丁宏恩, 等. 多主题电网设备综合智能告警技术方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015(10): 116-122.

作者简介:

李 熠(1981), 硕士、工程师, 主要研究方向为变电站集中监控;

龚成明(1977), 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度控制;

何 锐(1975), 高级工程师, 主要研究方向为电网调度自动化。

(收稿日期: 2018-05-03)

基于电脑钥匙易损状况与改进措施的分析研究

杜禹瑶¹, 粟和林²

(1. 国网广元供电公司, 四川 广元 628000;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:在电力负荷调整中,倒闸操作是常有的事,为保证安全稳定性,设有程序锁和电脑钥匙,必须每步检定,按序开锁,方能实施操作。其中电脑钥匙为移动式工作,需蓄电池作为支撑电源,使用后需及时补足电能。现蓄电池普遍采用快充转浮充方式,长期处于热饱和状态,使其金属、化学元素老化快、寿命短。为此开展了智能充电控制器的探索研究,将每日限充2 h与应急快充相结合,既保证应用时有足够电能,又大幅延长电脑钥匙使用寿命,同时有利环境保护和节约资金。

关键词:蓄电池;热浮充;限时控制;延长寿命

中图分类号:TM734 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)05-0091-04

Analysis and Research on Vulnerability of Computer Key and Its Improvement Measures

Du Yuyao¹, Su Helin²

(1. State Grid Guangyuan Power Supply Company, Guangyuan 628000, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:In power load adjustment, brake operation is a common thing. In order to ensure its safety and stability, there has program lock and computer keys, which should be verified in each step and unlocked in sequence so as to implement the operation. The computer key is a mobile work, which needs storage battery to be the energy support and be charged in time after the usage. At present, the storage battery generally adopts the fast charging to floating charging mode, and is in hot saturation state for a long time, so that the metal and chemical elements of storage battery are aged quickly and have a short service life. For this reason, the research of intelligent charging controller is carried out, which combines the daily limited charge of 2 hours with the emergency fast charging, not only ensures that there is enough electric energy in the application, but also greatly prolongs the service life of computer keys. At the same time, it is beneficial to environmental protection and saves a lot of money.

Key words:storage battery; hot floating charge; time-limited control; prolonging service life

0 引言

在电力系统中,被广泛应用的五防程序锁及电脑钥匙在倒闸操作中起到检测判断,逐锁打开,每步正确,才能实施操作的规范约束,由此提高了安全可靠^[1]。但因电脑钥匙为移动式工作,需蓄电池作为能源支撑,使用后必须补足电能。

现生产厂家对蓄电池都设计为使用缺电后,强制充电、浮充维系的方式。这样存在以下不利因素:

- 一是报废快。蓄电池长期充电,其中金属与化学元素不停运动反应,在热饱和状态下,老化快,寿命短,给工作造成严重影响。
- 二是耗能高。充电是必需的,但在充满后不中断电源长期浮充,仍有几瓦至几十瓦的电能在消耗,计及全国全省电脑钥匙,这不是一个小数目。
- 三是费用大。一台电脑钥匙 8000 余元,重购更换将增大经济损失。
- 四是影响环境。所用电池常为镉、镍、铅、锂等重金属和氢氧化钾等电解液制成,这些物质在大自

然中对水源和土壤都会严重污染,甚至对人体造成危害。

综上所述,为延长蓄电池使用寿命,减少废弃污染开展了电脑钥匙充电控制器的探索研究。

1 结构原理

为解决蓄电池热浮充、老化快的问题,经分析探索,决定引入智能手段,限制每天充电时间,让蓄电池绝大多数时间处于冷机状态,由此大幅改变不利因素。充电控制器主体结构见图1。

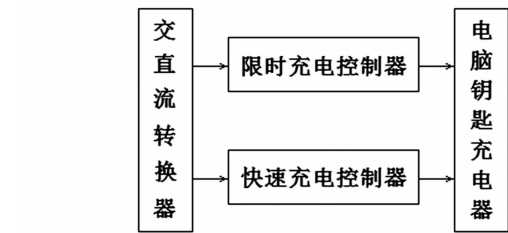


图1 充电控制器主体结构

五防电脑钥匙充电控制器由4个单元组成,分别是:

1)交直流转换器。将220 V电源通过降压、整流、滤波、稳压,转换为适合于仪器内部各功能元件运作的直流工作电源。

2)限时充电控制器。采用时钟芯片设计的计时、定时控制器。利用该装置设置每天2 h的导通供电,其余时间截止断电,以此减少蓄电池热浮充时间,延长五防电脑钥匙使用寿命。

3)快速充电控制器。当一个开锁程序操作完毕,紧接着需要进行下一个开锁操作时必须对蓄电池进行紧急充电的情况,专项增设了一个随时启动电源快速充电控制,完成快速充电的方式。

4)电脑钥匙充电器。考虑到现场相关仪器型号、结构、恒压源、恒流源等充电方式不统一,为此将限时和快充两种方式并接到同一个电源转换器,再将原有充电器接入该电源转换器,既维护原有结构体系,又置入新的限时充电控制功能。

2 充电控制器电路设计^[2]

2.1 交直流转换

充电控制器内部功能元件要运作,必需具备工作电源,该电源一般采用12 V直流。交直流转换电

路见图2。

在图2下部,交流220 V电源在开关K1合上后,经变压器降压至12 V,再经D1-4桥式整流、电容C1滤波、三端稳压器WY1稳压,将直流正负极分别送往上端时间控制器。

2.2 时间控制电路

倒闸操作并非天天有,电脑钥匙亦不常用,为改变热浮充老化快的问题,决定采用每天限制充电2 h、其他时间断电的处理方式,做了图2上部的电路设计。

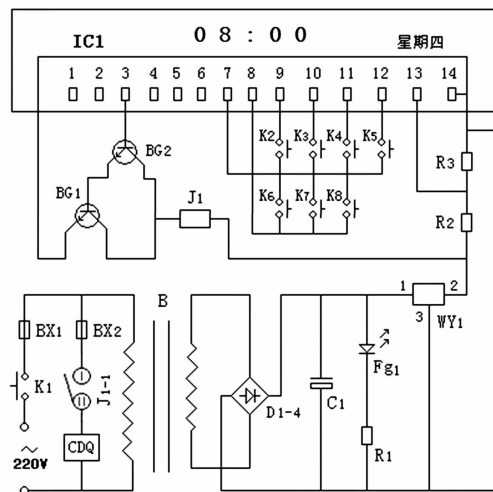


图2 时钟控制电路

图2上部IC1是CY-56型智能时钟芯片,它含有晶振、分频、存储等硬件电路,并经软件编程,对分、时、周等进行迭加计算,通过K6-8功能开关和K2-5数字键进行校时和定时设置,做好控制准备。

在图2中,12 V稳压电源正极经R2、R3分压为1.5 V,接往时钟芯片IC1的13脚,IC1的14脚连接负极,作为工作电源。在设置时间到达时,IC1的3脚输出高电平,使复合功放管BG₁、BG₂导通,继电器J₁启动,常开结点J₁₋₁闭合,将220 V交流电经保险丝BX₂接通,向五防钥匙充电器CDQ供给经时间控制的工作电源。

2 h后,设置的停电时间到达,IC1第3针脚截止输出,BG₁、BG₂失电,继电器J₁关闭,常开结点J₁₋₁断开,蓄电池停止充电。

图2中经电阻R₁分压,发光二极管Fg₁点亮做为工作指示。

基于设计所做的时间控制充电器如图3所示。

在图3中,上面是插接被充电脑钥匙的槽孔,可替换以适用多种类型;中间是功能指示灯和时钟数

字显示屏;下面为校时、定时触摸开关。



图3 自制时控器



图4 定时转换器

3 快速充电设计

当完成某项倒闸操作后,按要求须进行紧急充电,以备下次操作使用。但此时控制器不一定在设置的限时充电时间段内,满足不了充电要求。为此,增设了快充设计。

快充电路有两大任务要完成:1) 缺电速充;2) 充满断电。为此,选取了计时控制方式进行处理。

图4是PY—08型定时转换器,内含交直流转换器件及智能时钟芯片,已做好硬件连接和软件编程;外部有“设置”按钮,可做1 h、2 h、4 h、6 h、8 h、10 h的倒计时选择;面板配有万能插座,被控仪器电源头插入此处,即可开展工作。

快充定时转换器插上电源,若未设置时间或指示灯全灭时,可按下“设置”开关,每按一次,相关指示灯对应数字升高一位,根据被控器件所需运作时间,进行1 h、2 h、4 h、6 h、8 h、10 h的选择,取值完成后松开手,仪器即开始工作提供电源。

所设时间计时完成,时控器自动断开电源,停止供电。仪器设置时间后只运行一次,若不重新启动,

将不再供给电源。

仪器具有记忆功能,在上次设置后,若无改变,仪器仍按原定时间运行,由此减少了相同仪器的繁琐操作。

上述设计能满足五防电脑钥匙快速充电所需的选时定时、充满断电、一次供电的要求,结合每日限充2 h控制功能,共同发挥作用,实现对蓄电池的有效充电控制并消除热浮充影响。

4 整体设计方案

实际连接使用方法见图5。

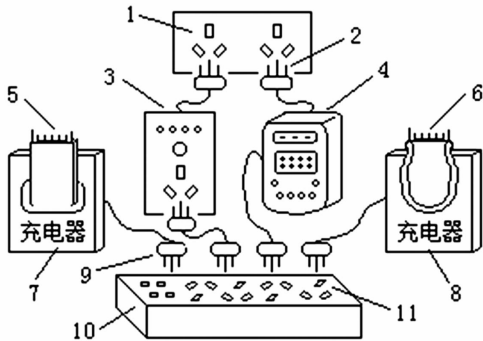


图5 实用连接

在图5中,1为220 V电源插座,2为两仪器的电源插头,3为快充定时仪器,4为限时充电仪器,5、6为不同形式的五防电脑钥匙,7、8为五防电脑钥匙配套的充电器;9为四套仪器的电源插头,它们都统一插入电源板10的相应插座11中,中间的插座为快充仪和限时器向电源板输入的控制电源,两侧的插座是从电源板接收被控电源。

所做的改进设计,有3项特点:

1) 快充供电。据统计,电脑钥匙使用后,补充充电时间一般有3~4 h即可,所设计的定时转换器可在10 h内选择设置,充电时间满足要求;再者,即便时钟放宽一些,蓄电池充满后,在原充电器中短时间续充影响不大,不会像长期热浮充老化、损伤严重,故使用环境更加宽松可靠。

2) 双控制器运作。每日限时充电是设定的,而快速充电是随机的,两者多数时间独立工作,也有可能出现时间重叠,共同向电源板提供220 V交流电源,这只是并联运行,不产生附加影响。

3) 使用原充电器。利用原充电器的有效功能,维护了各充电器自身的恒压源、恒流源、充电参数的

低投资、节约能源、减少环境污染等。

设计方案实质采用了倒计时与正计时两种控制方式,将快充和限时充电相结合,彼此互补,能确保电脑钥匙在倒闸操作中的电量需求和功能发挥。

目前所设计的方案还存在着快充定时转换器与限充定时仪的分体工作问题。为此,今后将进一步分析研究其元件配置和电路结构,尽量将两者合并一起,形成整体仪器,使之用于现场更加方便简化。

5 结 语

在对五防电脑钥匙损坏报废快的问题中,分析查找到了蓄电池热浮充是主要原因,并制定了改进方案,实现了缺电快充、待机限充的双层功能,既保证电脑钥匙在使用中有足够能量,又使其多数时间处于冷机状态,这样可以延长电脑钥匙使用寿命、降

(上接第 75 页)

已在国内造成数起事故,所以应对绝缘拉杆的机械强度、连接可靠性及防范措施给予足够的重视。

1) 高压断路器绝缘拉杆与动触头装配连杆的连接是否牢固,对提高断路器动作可靠性和确保电网安全运行至关重要,制造厂家要特别重视这个部位的结构设计、零部件加工和装配工艺。

2) 鉴于目前对绝缘拉杆松动尚无直接的检测手段,建议对断路器的正常分合闸的位置进行标记,并在日常运行中加强对该型断路器的监视;同时,在断路器分合闸到位后,应检查监控和保护装置的动作信息情况,并检查断路器操作后一次回路电流、电压是否正常。

3) 建议对此类绝缘拉杆结构的 LW6-220 断路器及时进行更换,对于无法更换的断路器,除在绝缘拉杆旋接部位增加胶粘外,还应再采取安装定位销等可靠的防松动措施。

6 结 论

LW6-220 型断路器现在已经运行十几年,其绝缘拉杆松动正处在高发期,而绝缘拉杆松动是由材料、工艺、结构以及使用时间引起,必须采取相应的预防措施确保设备安全可靠运行,才能保证电力系统安全稳定运行。

参考文献

- [1] 周兴华, 黎文安, 文康珍. 电脑钥匙在微机防误闭锁系统中的应用[J]. 继电器, 2003(3): 54-57.
- [2] 黄建林, 吴化洪, 刘国勇, 等. 变电站五防电脑钥匙智能充电板的开发与应用[J]. 电工技术, 2017(1): 35-37.
- [2] 王晓曦. 浅谈可调式充电定时器的设计[J]. 科技风, 2017(5): 16-16.

作者简介:

杜禹瑶(1983),本科、助理工程师,从事变电运行和线路检修工作:

栗和林(1951),高级工程师,从事变电站安装、调试研究工作。

(收稿日期:2018-04-17)

参考文献

- [1] 马虎涛,黄章强. LW6-220 型断路器绝缘拉杆脱落故障分析[J]. 高压电器,2014,50(11):128-132.
- [2] 李冠华,丁爱华,鲁旭臣. LW6-220 型 SF6 断路器常见故障分析[J]. 东北电力技术,2016,37(3):26-29.
- [3] 林其雄. 110 kV SF₆ 断路器爆炸事故分析[J]. 高压电器,2004,40(6):478-478.
- [4] 丁著明,吴良义,范华,等. 环氧树脂的稳定化(Ⅰ)——环氧树脂的老化研究进展[J]. 热固性树脂,2001,16(5):34-36.
- [5] 马虎涛,黄章强. LW6-220 型断路器绝缘拉杆脱落分析[J]. 云南电力技术,2014,42(z1):80-82.
- [6] 陈注君,袁成斌. 750kV 断路器绝缘拉杆脱落引起的故障分析[J]. 城市建设理论研究(电子版),2012(31).
- [7] 曹明德. LW6-220 开关绝缘拉杆脱落分析及对策[J]. 山西电力,2004(6):52-53.
- [8] 葛玉敏,梁爽. 一起断路器故障的综合分析[J]. 高压电器,2009,45(5):159-160.
- [9] 彭毅方,周辉. 一起线路及断路器故障的保护动作及断路器失断原因分析[J]. 电力自动化设备,2005,25(2):97-99.
- [10] 孟建英,郭红兵,王惠君,等. 一起 500 kV SF₆ 断路器故障分析[J]. 中国电力,2011,44(7):77-79.

作者简介:

王嘉易(1987),工程师、硕士,从事断路器类设备状态评价、故障分析及新技术研究。

(收稿日期:2018-06-05)