

低频振荡分析及抑制策略概述

郭磊¹, 张英敏², 李兴源²

(1. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516001;
2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:在分析了低频振荡产生原因的基础上,概括出低频振荡的分析方法具有基于系统实测信号和基于系统数学模型两大类,并对具体分析方法细化;总结交直流互联系统中低频振荡的抑制策略;重点对低频振荡的抑制及其关键技术问题研究现状进行介绍;最后对于低频振荡的后续热门研究问题做了展望。
关键词:低频振荡;系统实测信号;系统数学模型;分析方法;抑制策略;研究现状
中图分类号:TM712 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)01-0001-09

Overview of Analysis Methods and Suppression strategies for Low Frequency Oscillation

Guo Lei¹, Zhang Yingmin², Li Xingyuan²

(1. Huizhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou 516001, Guangzhou, China; 2. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract:Based on the cause analysis for the occurring of low frequency oscillation, the analysis methods of low frequency oscillation is concluded, which has two kinds, that is, based on the system measured signal and based on the system mathematical model separately, and the concrete analysis methods is refined. The strategies used in suppressing the low frequency oscillation in AC-DC interconnected system are summarized, and then the current states of the key problems about suppressing the low frequency oscillation are introduced in detail. Finally, the prospects are carried out on the follow-up hot researches of low frequency oscillation.
Key words:low frequency oscillation; system measured signal; system mathematical model; analysis method; suppression strategy; current states

0 引言

随着电力系统电压等级的提高和电网建设规模的扩大,中国已经形成了东北电网、华北电网、华中电网、华东电网、西北电网和南方电网6个跨省的大型区域电网和电网间的互联,交直流并存已经成为电网发展的必然趋势。电网互联使得电网动态稳定问题日益复杂,区间弱阻尼是大规模电网面临的主要挑战之一,低频振荡问题越来越成为限制电网安全稳定运行的主要因素。

南方电网项目:机电暂态仿真程序中高压直流输电控制系统的简化和优化研究与软件模块开发

下面首先分析低频振荡产生的原因,归纳出低频振荡的分析方法,总结出交直流互联系统中低频振荡的抑制策略;然后重点对低频振荡的抑制及其关键技术问题研究现状进行介绍;最后对于低频振荡的热门研究方向做了展望。

1 低频振荡的产生原因

低频振荡是指当电力系统受到了干扰后,并列运行的同步发电机转子间由于相对摇摆导致系统出现0.2~2.5 Hz不同程度的振荡现象。低频振荡可分为区域间振荡和区域内振荡。区域间振荡模式是

指两个区域机群之间发生 $0.2 \sim 0.7$ Hz 的振荡,振荡频率相对较低^[1-2];区域内振荡是指个别发电机组与系统内其他机组之间的摇摆,其振荡频率比较高,在 $0.7 \sim 2.5$ Hz 之间。电力系统低频振荡是电力系统发生小干扰稳定性的问题,主要有以下因素^[3]:

- 1) 由于阻尼过低互联电力系统机电模式引起的低频振荡;
- 2) 发电机励磁系统较大的电磁惯性引起的低频振荡;
- 3) 较大励磁增益的励磁调节器作用引起的低频振荡;
- 4) 因不恰当的控制方式导致的低频振荡;
- 5) 由互联系统的弱联系、区域间功率的不平衡、直流控制系统、控制方式及交流与直流系统间的相互作用等。

2 低频振荡的分析方法

电力系统低频振荡主要有两大类分析方法:基于系统实测信号和基于系统数学模型的分析方法。基于系统的数学模型分析方法需要建立系统的全阶模型,但其有一些缺陷。随着电力系统 WAMS(wide area measure system)技术的发展,应用 WAMS 对实测信号振荡特性分析已经成为研究的焦点^[4]。

2.1 基于系统数学模型的分析方法

2.1.1 复频域法

复频域法通过对电力系统状态方程的特征根求解以获得其振荡模式信息,通过对特征向量和特征值灵敏度等的分析计算,得到相关振荡的更多信息。QR 算法是最基本的电力系统复频域分析方法,具有鲁棒性好、收敛速度快等优点,但是不能处理高阶系统^[5]。随着电力系统的日益复杂,很多学者提出了多种替代方法,主要包括电力系统基本自发振荡分析方法(analysis of essentially spontaneous oscillation in power system, AESOPS)、选择模态法、Arnoldi 算法等。文献[6]介绍了用于电力系统静态稳定分析的 QR 算法和 AESOPS 算法。文献[7]通过采用轨迹特征根法,得到按减小联络线功率来调整机组出力可能引起的负阻尼效应;可以通过减小小映象功角调整机组出力进而抑制低频振荡。文献[8]运用 Chebyshev 多项式加速的重启 Arnoldi 算法,计算出

电力系统按实部递减的特征子集。使用单向量重启并用 Chebyshev 多项式加速,增加所需特征值在基向量方向的分量,同时减小不需要特征值在基向量方向的分量。

2.1.2 时域仿真法

时域仿真法是根据元件间的拓扑关系把系统各元件模型构成一个全系统模型,通过稳态值求得系统的状态量及其随时间变化代数量的曲线,得到小扰动下系统是否能保持同步稳定运行的结论^[9-10]。文献[11]基于 RTDS 建立一个单机无穷大电力系统模型,验证了 PSS4B 在高、中、低频段对低频振荡抑制的效果,得到中心频率的变化会对反调效果产生影响。但时域仿真法有仿真时间长、计算量大、提供的系统模式信息量小、不能激发所有关键振荡模式等缺点。

2.1.3 基于正规形理论的分析方法

正规形理论方法通过将非线性系统进行坐标变换,可以使原系统和一个线性二阶或更高阶系统等价。在用正规形理论进行电力系统稳定分析时,其对小信号法的优点进行了保留,又对不同振荡模式间的非线性作用进行了考虑,可以对大扰动下电力系统中存在的低频振荡进行分析^[12]。文献[13]运用正规形理论对一双馈入互联输电系统中存在的非线性作用做了研究。文献[14]介绍了如何将正规形方法用于电力系统振荡的稳定分析和如何将小干扰法中的参与因子分析法用于非线性系统中。文献[15]运用正规形分析法分析系统中的低频振荡,得出正规形变量初值和变换系数的乘积可以反映超低频或倍频振荡模式状态量响应作用程度的结论。

但是,正规形理论分析方法也存在一定的缺点。计算比较复杂,需要依赖于研究新的算法和软件水平的提高;由于其基于系统的微分方程组的泰勒展开,会存在一定的截断误差,将影响系统的分析。

2.1.4 基于分岔理论的分析方法

系统中低频振荡的稳定极限与微分方程发生 Hopf 分岔的情况有关,可以用局部分岔理论中的 Hopf 分岔理论对系统的低频振荡进行分析^[16]。文献[17]运用 Hopf 分岔理论和中心流形理论对电力系统中低频振荡存在的非线性奇异现象进行研究。分析一电力系统中 Hopf 分歧线性发生的条件,揭示与线性化分析方法不同的小干扰稳定域的新现象。文献[18]采用分岔理论方法分析含双馈风机电力

系统的电压稳定性。文献[19]构造可以同时实现 Hopf 分岔和阻尼控制的多目标优化模型,由于采用直接法会对初值要求比较高,提出采用准 Hopf 分岔指标来实现 Hopf 的分岔控制,然后运用 Pareto 排序和进化方法求解最优问题,通过一具体系统模型仿真验证所提出模型和方法的正确性。

2.2 基于系统实测信号的分析方法

基于系统实测信号的分析方法实际上是通过系统受扰动后的响应轨迹进行分析,主要有滤波器类、回归分析类、傅里叶类、经验模式分解类、prony 类、高阶统计量类、TLS - ESPRIT 算法类等。

2.2.1 滤波器类方法

电力系统低频振荡的分析和监测是根据所测得数据的计算频率和阻尼系数辨识出系统的振荡模式。文献[20]使用基于窗口法设计的 FIR 数字滤波器,它具有较好的频选性能,能在保证信号不失真的同时滤除噪声信号,进而提高监测算法的灵敏度。文献[21]根据低频振荡的频率特性,运用带阻滤波器的性能,在监测到电力系统发生低频振荡且振荡是由系统的调速系统所引起时,投入串联连接的滤波器和调速系统的 PID 控制器,实现低频振荡扰动信号的滤除和平息振荡的作用,时域仿真结果表明所使用的滤波器类方法的有效性。

2.2.2 回归分析类的方法

常用的参数谱估计法^[22]有滑动平均自回归(auto - regressive moving average, ARMA)模型以及自回归(autoregressive, AR)模型。文献[23]运用非线性回归分析方法,可以实现在低频振荡发生后的 1/4 周期内准确地估算出振荡频率。在 Matlab 中进行仿真,结果表明所采用的非线性回归法具有较高的精度,对于具有较大衰减幅度的振荡波形也能准确地测出其振荡频率。文献[24]采用了一种基于奇异值分解的 ARMA 定阶分析方法,首先辨识出 ARMA 模型参数,然后运用 ARMA 谱估计出系统的低频振荡主导模式。通过对测试系统进行仿真和对南方电网实测的类噪声数据进行分析,表明所采用 ARMA 方法可以准确地辨识系统的低频振荡的振荡模态,同时其对于弱阻尼模式下系统的参数辨识也具有较高精度。

2.2.3 傅里叶类方法

傅里叶变换可以对电力系统中的平稳信号进行频谱分析^[25]。文献[26]根据低频振荡具有带宽较

窄、主导振荡模式较少的特点,提出了一种用于主导模式辨识的分段傅里叶神经网络的分析方法。根据分段傅里叶系数辨识出系统主导振荡模式的频率和衰减因子,再据其与衰减时间窗的关系求得幅值。该方法既保留了傅里叶算法的抗噪性能,又可以利用神经网络训练进一步提高了系统的可靠性。文献[27]提出用窗口傅里叶脊(windowed Fourier ridges, WFR)对非平稳振荡信号进行分析。WFR 利用窗口傅里叶变换来反映振荡信号所具有的频域特性,以极大值点来反映信号的振幅,通过窗口滑动反映振荡信号的时域特性,进而对非平稳振荡信号频率和阻尼的时变性进行反映。

2.2.4 经验模式分解类方法

经验模式分解法(empirical mode decomposition, EMD)的本质为从时间尺度上实现对信号的平稳化、线性化的处理,然后按频率由高到低依次分离出本征模态函数分量^[28]。文献[29]对所研究电力系统传输线路上的有功振荡信号做经验模式分解,然后对分解得到的本征模态函数分量做希尔伯特谱分析,最后通过与其他方法比较,证明了经验模式分解方法的有效性。经验模式分解法虽有较好的适应性,但也有过冲现象、端点效应等问题。现有研究多集中在对 EMD 方法进行改进并与其他方法相结合来对系统振荡进行分析。文献[30]利用 EEMD 对非平稳信号进行处理,通过 EEMD 滤波器、信号能量权重和互相关系数筛选出系统的主导模式分量;然后运用自然激励技术(natural excitation technique, NExT)求解互相关函数,将信号能量分析法的辨识阻尼比应用于预警系统。

2.2.5 Prony 类方法

Prony 算法利用指数函数的线性组合来拟合实测的振荡信号,从而得到振荡信号的幅频、相位、阻尼等信息^[31]。文献[32]提出一种基于 Prony 算法和形态滤波相结合的低频振荡辨识方法,能够准确地辨识出混合噪声干扰下低频振荡的模态。对去噪声后的信号运用 Prony 算法进行辨识,能够准确地获得系统中低频振荡的各种振荡模式及参数。

文献[33]采用一种改进多信号 Prony 算法对低频振荡进行在线辨识。运用小波变换去除噪声,利用 SVD - TLS 方法对信号进行定阶,然后根据最小二乘算法辨识出系统的振荡模式。但 Prony 类方法对所测信号的不平稳性没有进行考虑,故在分析非

平稳的振荡信号时,采用强制拟合将使分析的结果中含有一定的虚假量。

2.2.6 TLS – EPSRIT 方法

TLS – ESPRIT 算法是对谐波恢复、振荡衰减正弦信号参数估计的重要工具,被广泛应用于电力系统的暂态信号分解、谐波和间谐波高精度检测、分布式电源解列控制等场合。在线辨识系统低频振荡的主要难题是系统噪声对辨识和定阶带来的影响。TLS – ESPRIT 算法具有更强的抗噪、抗干扰能力,并且具有较高的计算效率^[34]。文献[35]运用 TLS – ESPRIT 算法辨识出系统的低频振荡和次同步振荡模态,基于线性矩阵不等式的鲁棒控制设计方法,设计出针对不同振荡模式的多通道附加高压直流控制器,实现了对系统中存在的低频振荡和次同步振荡同时抑制,由此可见 TLS – ESPRIT 算法是对互联系统辨识的一种有效方法。

2.2.7 高阶统计量类方法

高阶统计量类方法被用来分析被测信号偏离高斯信号的程度,能提供所测信号的幅值和相位信息,可以有效检测和分析信号的非线性特点。其被广泛应用于雷达目标特征信息的提取、声波干扰的分析、谐波信号的处理、语音处理以及故障诊断等方面^[36]。但目前对高阶谱理论应用于低频振荡分析的研究还比较少。文献[37]采用互高阶谱奇异值分解方法对电力系统低频振荡的模式进行分析,该方法具有良好的谱估计分辨率和谱估计稳定性,但因其采用仿真信号进行测试,实测信号下该方法的实用性需要验证。

3 互联系统中低频振荡的抑制策略

低频振荡产生的主要原因是由于系统的弱阻尼和负阻尼引起的,对互联系统的低频振荡抑制可以从电力系统一次系统和二次系统进行附加控制。现有研究多集中在利用二次系统附加控制器改善系统的低频振荡情况:对于发电部分可以通过对励磁系统附加阻尼控制;对于输电部分则可通过对高压直流输电系统或柔性交流输电系统的功率调整等方式进行控制。

3.1 一次系统的控制方法

3.1.1 增强系统的网架结构

交直流系统间的弱互联存在产生低频振荡的风

险,可以对系统的互联网架结构做出改变,比如避免大负荷、远距离的输电,或在输电线路上增加系统间的联络线条数等。文献[38]通过对强互联与弱互联系统中的阻尼转矩进行对比,分析了弱互联系统中的区域联络线阻抗会较大程度地减少系统阻尼;通过增加东北—华北互联系统间联络线的个数,改善了互联系统的阻尼,实现对系统中低频振荡的抑制。

3.1.2 储能类装置

储能类装置由于具有可以快速吸收和发出功率的特点被用于提高电能质量、进行电力系统调峰和改善运行稳定性等方面,对于抑制互联系统间的低频振荡也有一定的效果^[39]。

目前主要的储能类装置分为化学类储能和物理类储能。物理类储能中的超导储能装置具有能量转换效率高但一般容量较小的特点;化学类储能中的电池储能装置能量转换效率没有超导储能的高,但因其应用模块化结构,具有容量大、体积小的特点。文献[40]提出采用储能装置用来抑制电力系统的低频振荡,应用 PSS/E 软件在一四机两区域模型和华东电网模型进行了仿真,比较了不同控制方式及不同容量下电池储能装置对于系统中低频振荡的抑制效果,结果表明储能装置的控制方式及容量对抑制低频振荡的效果有较大影响。飞轮储能系统具有对有功功率和无功功率独立调节的能力,通过一定的控制策略可以补偿系统的振荡功率、快速平息振荡进而抑制系统的低频振荡。

3.2 二次系统控制方法

3.2.1 电力系统稳定器

在互联电力系统中安装电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)是抑制系统低频振荡的一种重要手段。PSS 可以通过调节发电机的励磁产生阻尼转矩进而增加发电机的阻尼,补偿互联系统运行下的负阻尼转矩,实现对电力系统低频振荡的抑制。文献[41]分析了湖北电网发生低频振荡的原因,采用小干扰频域分析法对系统的振荡模式进行计算,针对不同振荡模式计算出强相关机组并设计出该系统 PSS 的参数,提出抑制低频振荡的具体措施,通过时域仿真验证所投入的 PSS 具有较好的控制效果。

PSS 在不同的参数控制下具有不同的控制效果。恰当的控制参数能使 PSS 增加系统的阻尼,具有较小的无功反调;不恰当参数下的 PSS 会降低系

统的稳定性,降低系统的阻尼并有较明显的无功反调。文献[42]采用小扰动频域分析和暂态时域分析相结合的方法能够较准确计算 PSS 的参数,能够实现低频振荡的较好抑制。

但是单独运用 PSS 控制具有以下缺点^[43]:1)不能直接应用相对角速度和相对功角构成闭环控制。相对功角和相对角速度是较有效地实现阻尼控制的信号选择,但缺少必要的测量方法被局限于只能采用本地信息。2)PSS 采用本地测量信号构成反馈控制,不能较好地反映区域间的振荡信息,导致其只能对区域内振荡进行阻尼,难以有效抑制区域间低频振荡。3)分散设计出的 PSS 缺少控制器间的协调会使低频振荡加剧甚至产生新的振荡频率。

3.2.2 基于柔性交流输电系统的附加阻尼控制

随着电力系统互联规模的不断扩大,区域间低频振荡成为限制大规模互联电力系统传输能力的重要因素。通过对发电机组安装 PSS 抑制区域间低频振荡效果不太理想。FACTS 具有安装地点灵活且有较好的动态效果,为抑制区域间低频振荡提供一种新的控制方法。常见的 FACTS 装置有静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)、静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)、晶闸管控制串联电容补偿器(thyristor controller series compensation, TCSC)、统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)等^[44-45]。

文献[46]分析并联储能型 FACTS 装置对低频振荡进行抑制的方法,根据相位补偿方法设计出并联储能型 FACTS 装置的附加阻尼控制器,在 PSASP 软件下进行仿真验证。结果表明并联储能型 FACTS 装置能够有效地抑制交流线路的功率振荡,增强互联系统的阻尼比,提高了华中和华北电网联网的稳定性。文献[47]设计出计及信号传输时滞的 FACTS 阻尼控制器用于对互联电力系统的低频振荡进行抑制。该控制器既能有效对区域间低频振荡进行抑制,又能一定程度地承受信号的传输时滞,具有较好的控制效果。

3.2.3 HVDC 直流调制的附加阻尼控制

自美国太平洋交直流输电系统联络线采用安装功率调制器来阻尼交流输电线上的振荡以来,直流调制在电力系统的安全稳定和联网技术中的作用备受关注,相关研究^[48-49]表明,高压直流输电中的直

流调制对于阻尼互联系统区域间的低频振荡具有较好的控制效果。

为提高交直流互联电力系统的整体动态稳定性,文献[50]提出采用一种基于混沌优化的自适应粒子群优化算法,对多馈入高压直流输电系统进行直流调制以及优化协调。在一交直流系统中进行仿真,结果表明该算法能够较好地实现各直流系统直流调制间的优化协调,增强了系统对低频振荡的抑制能力。

3.2.4 最优励磁控制策略

最优励磁控制(optimal excitation control, OEC)方法由线性最优励磁控制(linear optimal excitation control, LOEC)和非线性最优励磁控制(nonlinear optimal excitation control, NLOEC)构成。

LOEC 是采用线性二次型理论设计的一种现代控制理论中的新型励磁控制方法。和经典励磁控制方法相比,它有动态响应性能好、稳定范围大等优点。文献[51]将 PSS 复数频率设计方法引入到 LOEC 当中来,提出了一种基于极点配置的 LOEC 设计方法。极点配置的 LOEC 方法可以适应系统在较大范围内变化,且在不同扰动下均能具有较好的控制性能。NLOEC 理论是根据微分几何的理论,在准确线性化了的电力系统模型基础上,能够较好地适应电力系统受到大干扰后偏离起始平衡点的状态。文献[52]利用 PSASP 程序中的自定义功能设计用于华中电网模型的非线性最优励磁控制器,并进行仿真分析,结果表明安装非线性励磁控制器能够提高系统的阻尼,使得系统受到故障或扰动影响后引起的低频振荡能够快速地衰减。

4 低频振荡抑制及关键问题研究现状

4.1 广域时滞问题研究现状

对于抑制交直流互联系统中的区域间低频振荡,广域附加阻尼控制具有较好的控制效果。但信号采集和传递过程中会存在时滞问题,时滞将影响所设计控制器的控制效果,因此对于广域信号时滞的补偿显得很有必要。文献[53]运用 Pade 方程对广域信号产生的时间延迟进行建模,并用线性分式变换方法把时间延迟看做是不确定因素,利用线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)方法设计系统的广域自适应监控器。文献[54]提出一种考

虑时间延迟影响设计 PSS 的方法,采用 Pade 逼近法近似时间延迟,并写成状态空间形式,与 PSS 共同构成了时间延迟控制器,使系统变为不含时间延迟的控制系统,再应用进化方法整定 PSS 的参数。

文献[55]分析了时间延迟对互联电力系统低频振荡阻尼的影响,为使系统在较大时间延迟时仍有较好的性能引入统一 Smith 预估器。通过对一四机两区域模型说明了时间延迟对模态阻尼的影响和延迟补偿的意义。仿真结果表明该控制器可以使发电机转速以及交流输电线路的传输功率在较大时间延迟下仍有较好的阻尼效果。文献[56]针对交直流互联系统区域间存在的低频振荡问题以及广域信号传输和测量过程中引入的时滞问题,通过计算采用交流联络线上的功率信号进行附加阻尼控制的滞后相位以及变化时滞引起的低频振荡信号中的滞后相位,将时域信号转换为旋转坐标下的向量信号,经过参考坐标角度的旋转进行阻尼和滞后相角的补偿;根据增益的放大,经过时域反变换后得到补偿后系统的直流附加控制量。仿真结果表明所提出的方法可以消除变化时滞的影响,能有效阻尼系统的振荡。

4.2 高压直流附加阻尼控制研究现状

4.2.1 HVDC 系统中附加励磁阻尼控制研究现状

PSS 是根据本地信号而设计的,主要是用来抑制本地的区域内低频振荡,附加励磁阻尼控制器的作用是通过反馈广域信号来提高互联系统的阻尼,该信号通常是机组的功角差、转子角速度差或者是振荡区域间的传输功率的偏差,这些信号需要由广域测量系统获得。

现有研究对高压直流附加励磁阻尼控制的研究已有很多,其中有大部分集中在对互联系统中的次同步振荡进行研究,还有一部分是对系统中的低频振荡进行研究^[57]。文献[58]通过设计系统的附加励磁阻尼控制器实现对互联系统中次同步振荡的抑制。文献[59]应用 LMI 算法设计系统的附加励磁阻尼控制器用于对系统低频振荡的抑制。附加励磁阻尼控制器可以对区域间振荡和区域内振荡同时进行抑制,但是现有研究还比较少。

4.2.2 HVDC 系统中直流系统附加阻尼控制研究现状

HVDC 系统中的直流附加阻尼控制主要是运用现代控制理论中的控制方法进行研究,目前其主要

控制方法有线性控制法、鲁棒控制法、自适应控制法和人工智能控制法等。

极点配置法^[60]是设计线性系统附加阻尼控制器的方法之一,在现代控制工程中不仅可应用于单输入单输出的系统,也可应用于多输入多输出系统,在电力系统低频振荡抑制中被广泛应用。

线性最优控制^[61]是现代控制理论中的一个重要分支。线性最优控制器受振荡频率的影响阻尼效果变化不大,可以提高系统的小干扰稳定极限,并且易于设计和工程实现;但线性最优控制器是根据系统稳定工作点的局部线性化模型而设计的,并没有考虑电力系统中的强非线性,所以其对大干扰下系统的作用效果不明显。

H2/H ∞ 算法^[62]是一种用于高压直流输电系统进行阻尼控制的比较成熟的控制方法,它可以综合考虑控制器的鲁棒性和控制代价,设定多目标函数,实现提高系统阻尼和控制效果的作用。

随着交直流系统作用的日趋复杂,采用恒定参数的控制器对系统进行附加阻尼控制显得力不从心,国内外学者尝试将自适应控制理论^[63]应用于低频振荡的抑制中。文献[64]针对变化的时间延迟信号应用递归最小二乘法辨识,提取出振荡信号的主导振荡模态,将时域信号转化为旋转坐标下的向量信号,通过对参考坐标体系的角度进行变化,分别对阻尼和时滞相角做了自适应补偿,从而实现对直流系统的自适应控制。文献[65]使用改进的 Prony 算法得到系统弱阻尼振荡模式下的阻尼比,并通过自寻优的方法调整控制器的参数,设计出一种基于广域动态信息的自寻优自适应附加阻尼控制器实现对系统的阻尼控制。但是该控制理论较为复杂,有一定的限制条件。

人工智能算法、模糊控制算法和神经网络算法^[66-69]也被用在高压直流的附加阻尼控制当中,但是由于需要迭代次数比较多,多用于控制器参数的寻优^[70]当中。

4.3 基于电压源换流器的高压直流附加阻尼控制研究现状

传统高压直流输电以其可以连接两个不同频率电网、长距离跨海输电、实现无功支撑、输电功率控制与提高电网稳定性等优势得到广泛应用^[71]。但它有换流站网侧谐波较大、无法向单纯负载点供电等缺点,使得传统直流系统在中小型容量和短距离

输电中缺乏竞争力。VSC - HVDC 系统具有能低功率运行、孤岛运行、向无源网络供电等优势弥补了这一不足,而得到成功的推广和应用^[72]。

现有对低频振荡的研究多集中在高压直流输电系统中。随着柔性直流输电的不断运用和发展,对于柔性直流输电系统中存在的低频振荡问题进行研究显得尤为重要,目前已经有一些学者对该方面进行研究和分析。文献[73]根据扩展阻尼比法选择广域信号作为反馈输入,同时利用极点配置法整定附加阻尼控制器的参数,实现抑制柔性直流输电系统中低频振荡。文献[74]将基于线性矩阵不等式的 H_2/H_∞ 多目标控制方法应用到柔性直流附加控制中,实现对低频振荡的抑制。文献[75]利用降阶开环模型和极点配置方法,设计出用于 VSC - HVDC 的附加阻尼控制器,实现增加系统振荡阻尼的作用。文献[76]选用交流线路的有功功率作为变参数向量,应用线性变参数法,设计出应用于 VSC - HVDC 的变增益附加阻尼控制器。但是所使用的控制方法设计出的控制器阶数普遍偏高,且控制器的控制效果不太理想,寻求控制器阶数低、控制效果好的抑制 VSC - HVDC 系统的低频振荡方法显得很有必要。

5 结论与展望

随着中国电力系统互联规模的不断增大及其运行方式的日益复杂,交直流互联系统间的低频振荡时有发生,限制了电网的传输能力。前面根据现有直流输电系统的实际问题以及构建数字化、信息化、互动化、自动化坚强智能网架结构的工程需求对于高压直流输电系统中低频振荡的分析方法以及抑制措施进行研究分析。

对于低频振荡的抑制问题尚有以下方面需要进行进一步研究:

1)对于互联系统的附加励磁控制器实现低频振荡的抑制,除运用经典电力系统稳定控制器、附加阻尼控制器外,还可以考虑运用 STATCOM、SVC 等 FACTS 装置与其进行协调优化,以取得更好的控制效果。

2)对低频振荡研究的过程中,考虑到信号采集过程中存在时滞问题,且一般系统时滞有不确定性,上面对于系统时滞采用不变时滞进行分析,所以对

变化时滞下系统的附加阻尼控制器效果的验证需做进一步研究分析。由于设计出的抑制振荡的阻尼控制器受时滞影响较大,有必要研究一种对于振荡更有效的时滞补偿控制器。

3)随着能源的不断消耗,采用风电、光电、太阳能等资源进行发电是大势所趋,对于小容量的能源的汇集研究很有必要。柔性直流输电系统恰恰满足这一优点,中国柔性直流输电系统正朝多端方向发展,对于多端 VSC - HVDC 系统中低频振荡附加阻尼控制研究分析显得尤为重要。

4)在设计低频振荡附加阻尼控制器过程中,一般选取发电机机端的转子角速度差或交流系统的有功功率作为输入信号,对于选用频率、无功功率作为输入信号进行辨识设计控制器进行提高系统阻尼的研究还比较少。

5)现有抑制低频振荡的附加阻尼控制器多集中在整流侧,通过对逆变侧的分析研究设计出逆变侧阻尼控制器,与整流侧控制器进行协调控制可以更好地改善系统的阻尼特性。

参考文献

- [1] Rogers G. Power System Oscillations [M]. Boston, USA: KluwerAcademic Publishers, 2000.
- [2] Demello F P, Corordia C. Concept of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control [J]. IEEE Transactions on PAS, 1969, 88(4): 316 - 329.
- [3] 杨东俊, 丁坚勇, 周宏, 等. 基于 WAMS 量测数据的低频振荡机理分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 24 - 28.
- [4] Hauer J F, Trudnowski D J, Desteese J G. A Perspective on WAMS Analysis Tools for Tracking of Oscillatory Dynamics [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 12(4): 1 - 10.
- [5] 武志刚, 张尧, 郑风雷, 等. 电力系统特征值与状态变量对应关系分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 23 - 26.
- [6] 张鹏, 王春燕, 刘玉田. 电力系统中全部特征值 QR 分析法的有效性[J]. 山东电力技术, 1997(1): 17 - 20.
- [7] 郝思鹏, 薛禹胜, 张晓明, 等. 基于 EEAC 理论分析低频振荡[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 11 - 15.
- [8] 杜正春, 刘伟, 方万良, 等. 大规模电力系统关键特征值计算的 Arnoldi - Chebyshev 方法[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(10): 995 - 999.
- [9] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析

- [M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [10] 陈刚,何潜,段晓,等. 电力系统低频振荡分析与抑制综述[J]. 南方电网技术,2010,4(3):17-22.
- [11] 袁亚洲,许其品,徐蓉,等. 基于RTDS的多频段电力系统稳定器效果验证[J]. 电力系统自动化,2013,37(18):126-131.
- [12] Liu Shu, Messina A R, Vittal V. Assessing Placement of Controllers and Nonlinear Behavior Using Normal Form Analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005,20(3):1486-1495.
- [13] 杨秀,徐光虎. 基于正规形理论的多馈入交直流输电系统非线性模式分析[J]. 电力自动化设备,2007,27(8):6-10.
- [14] 夏成军,周良松,彭波,等. 基于正规形理论的电力系统振荡稳定分析[J]. 继电器,2001,29(8):13-16.
- [15] 苏小林,周双喜,阎晓霞. 电力系统超低频振荡和倍频振荡的正规形分析[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):7-10.
- [16] Hassard B D, Kazarinoff N D, Wan Y H. Theory and Applications of Hopf Bifurcation[M]. Cambridge: U. K. Cambridge University Press,1981.
- [17] 邓集祥,刘广生,边二曼. 低频振荡中的Hopf分岔研究[J]. 中国电机工程学报,1997,17(6):391-394.
- [18] 宋墩文,杨学涛,丁巧林,等. 大规模互联电网低频振荡分析与控制方法综述[J]. 电网技术,2011,35(10):22-28.
- [19] 高磊,蒋平,顾伟. 基于多目标优化的电力系统阻尼控制及Hopf分岔控制[J]. 电力自动化设备,2008,28(8):65-68.
- [20] 王慧铮,许勇. 基于广域测量系统的低频振荡监测分析方法研究与应用[J]. 电网技术,2008,32(22):56-61.
- [21] 徐衍会,马骢,蔡筭. 基于滤波器的调速系统侧低频振荡抑制措施[J]. 电网技术,2014,27(12):47-50.
- [22] Wies R W, Pierre J W, Trudnowski, D J. Use of Arma Block Processing for Estimating Stationary Low Frequency Electromechanical Modes of Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1):167-173.
- [23] 石磊,谈顺涛,王光. 电力系统低频振荡频率的快速估计算法[J]. 电力自动化设备,2002,22(12):27-29.
- [24] 陈刚,段晓,张继红,等. 基于ARMA模型的低频振荡模式在线辨识技术研究[J]. 电网技术,2010,34(11):48-54.
- [25] Hiyama T, Suzuki N, Funakoshi T. On-line Identification of Power System Oscillation Modes by Using Real Time FFT[C]//IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 23-27, 2000, Singapore:1521-1526.
- [26] 竺炜,马建伟,曾喆昭,等. 分段傅里叶神经网络的低频振荡模式识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(15):40-45.
- [27] 郝思鹏,袁越,陈小虎,等. 用窗口傅里叶脊提取时变振荡信息[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):58-62.
- [28] Huang N, Shen Z, Long S, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1):993-995.
- [29] Messina A R, Vittal V. Nonlinear, Non-stationary Analysis of Interarea Oscillations Via Hilbert Spectral Analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3):1234-1241.
- [30] 汪颂军,刘涤尘,廖清芬,等. 基于EEMD-NexT的低频振荡主导模式工况在线辨识与预警[J]. 电力自动化设备,2014,34(12):111-116.
- [31] Hauer J F, Demeure C J, Scharf L L. Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(1):80-89.
- [32] 李安娜,吴熙,蒋平,等. 基于形态滤波和Prony算法的低频振荡模式辨识的研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(3):137-142.
- [33] 马燕峰,赵书强,刘森,等. 基于改进多信号Prony算法的低频振荡在线辨识[J]. 电网技术,2007,31(15):44-49.
- [34] Koessler R J, Prabhakara F S, Al-Mubarak A H. Analysis of Oscillations with Eigenanalysis and Orny Techniques[C]. Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [35] 李保宏,张英敏,李兴源,等. 多通道高压直流附加鲁棒控制器设计[J]. 电网技术,2014,38(4):858-864.
- [36] Ömer N G, Dogan G E. Power-quality Event Analysis Using Higher Order Cumulants and Quadratic Classifiers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2):883-889.
- [37] 刘座铭,王韵然,高宇,等. 基于互高阶谱SVD算法的电力系统低频振荡频率估计[J]. 东北电力大学学报(自然科学版),2007,27(4):95-98.
- [38] 余贻鑫,李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):6-11.

- [39] Pal B C, Coonick A H, Cory B J. Robust Damping of Inter-area Oscillations in Power Systems with Superconducting Magnetic Energy Storage Devices[J]. IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1999, 146(6): 633-639.
- [40] 赵静波, 雷金勇, 甘德强. 电池储能装置在抑制电力系统低频振荡中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 93-99, 108.
- [41] 余保东, 孙建波, 汤胜祥, 等. 湖北电网低频振荡计算分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 22(8): 39-42.
- [42] 沈昆仑. 电力系统稳定器 PSS 的参数选择和试验[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(2): 55-57.
- [43] 谢小荣, 肖晋宇, 童陆园, 等. 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 37-40.
- [44] Lerch E, Povh D, Xu L. Advanced SVC Control for Damping Power System Oscillations[J]. IEEE Transactions on Power System, 1991, 6(2): 524-535.
- [45] N Martins, L Lima. Determination of Suitable Locations for Power System Stabilizers and Static Var Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(4): 1455-1469.
- [46] 谢光龙, 马智泉, 张步涵, 等. 利用并联储能型 FACTS 抑制特高压互联电网功率振荡[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 237-242.
- [47] 李婷, 吴敏, 何勇. 计及广域测量系统时滞影响的灵活交流输电系统阻尼控制器多目标设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 227-234.
- [48] 徐梅梅, 李兴源, 王渝红, 等. 德宝直流调制对四川电网阻尼特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 141-146.
- [49] 李鹏, 吴小辰, 张尧, 等. 南方电网多直流调制控制的交互影响与协调[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 91-93.
- [50] 周孝法, 陈陈, 杨帆, 等. 基于自适应混沌粒子群优化算法的多馈入直流输电系统优化协调直流调制[J]. 电工技术学报, 2009, 29(4): 193-200.
- [51] 陆继明, 刘伯康, 毛承雄, 等. 基于极点配置的线性最优励磁控制设计方法[J]. 大电机技术, 2007, 31(1): 58-63.
- [52] 王志芳, 孙元章, 张广恕, 等. 非线性励磁控制器改善华中电网稳定性的仿真分析[J]. 电网技术, 1998, 22(3): 11-13.
- [53] Zabaoui T, Okou F, Dessaint L-A, et al. Time-delay Compensation of a Wide-area Measurements Based Hierarchical Voltage and Speed Regulator[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2008(33): 77-85.
- [54] 王成山, 石颀. 考虑时间延迟影响的电力系统稳定器设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 1-6.
- [55] 覃波, 李兴源, 胡楠, 等. 基于信号时滞补偿的 HVDC 和同步发电机的广域协调控制[J]. 现代电力, 2014, 31(3): 22-28.
- [56] 胡楠, 李兴源, 杨毅强, 等. 考虑时变时滞影响的直流广域阻尼自适应控制[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 281-287.
- [57] Electric Power Research Institute. HVDC System Control for Damping Subsynchronous Oscillations[M]. New York (USA): EPRI, 1982.
- [58] 张远取, 谢小荣, 姜齐荣. 应用附加励磁阻尼控制抑制 HVDC 引起的次同步振荡[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 1-5.
- [59] 袁金腾, 王秀明, 姜志国. 基于 LMI 的电力系统广域附加阻尼控制[J]. 东北电力大学学报, 2009, 29(4): 50-54.
- [60] 马燕峰, 赵书强, 顾雪平. 基于输出反馈和区域极点配置的电力系统阻尼控制器研究[J]. 电工技术学报, 2011, 31(16): 1-7.
- [61] 卢强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [62] Zhang Y, Bose A. Design of Wide-area Damping Controllers for Inter-area Oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1136-1143.
- [63] He Jingbo, Lu Chao, Wu Xiaochen, et al. Design and Experiment of Heuristic Adaptive HVDC Supplementary Damping Controller Based on Online Prony Analysis[C]//IEEE PES General Meeting, USA, 2007: 1-8.
- [64] 杨培宏, 魏毅立, 刘文颖, 等. 基于反演变结构方法的电力系统自适应阻尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 96-100.
- [65] 吴小辰, 陆超, 贺静波, 等. 直流广域自适应阻尼控制器设计与 RTDS 实验[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 11-16.
- [66] 孙琳, 李天然, 钱俊杰, 等. 基于模糊控制的广域阻尼控制器设计[J]. 中国电力, 2015, 48(6): 58-62.
- [67] Mokhtari M, Aminifar F, Nazarpour D, et al. Wide-area Power Oscillation Damping with A Fuzzy Controller Compensating the Continuous Communication Delay[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(5): 1997-2005.

藏区孤网 QV 特性与过电压风险防控

孙昕炜¹, 史华勃¹, 唐 伟¹, 赖 勇², 余莉娜³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网昌都供电公司, 西藏 昌都 854000; 3. 中国三峡新能源有限公司西南分公司, 四川 成都 610023)

摘 要:工频过电压问题是威胁四川藏区偏远山区孤网运行时的主要问题。首先提出了适用于偏远山区电网孤网运行的 $N-1$ 校核标准。在此基础上,以四川藏区典型结构的电网为例,从稳态 QV 特性以及考虑发电机低励限制的机电暂态特性的角度,分析了偏远山区电网孤网运行时的过电压产生机理。最后,提出了降低偏远山区电网孤网运行过电压风险的运行措施。所做研究对于提升偏远山区电网运行的安全稳定性具有指导性意义。

关键词:孤网运行; 工频过电压; QV 特性; 低励限制; $N-1$ 校核

中图分类号:TM71 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)01-0010-04

Q – V Characteristic and Overvoltage Prevention for Isolated Power Grid in Tibetan Area of Sichuan Province

Sun Xinwei¹, Shi Huabo¹, Tang Wei¹, Lai Yong², Yu Lina³

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

2. State Grid Cangdu Power Supply Company, Changdu 854000, Tibet, China; 3. China Three Gorges

New Energy Limited Company Southwest Branch, Chengdu 610023, Sichuan, China)

Abstract:Power – frequency overvoltage is a major threat to the isolated power grid of remote mountainous areas in Tibetan area of Sichuan province. Firstly, a novel $N-1$ check principle for isolated power grid in remote mountainous areas is proposed. Furthermore, the mechanism of power – frequency overvoltage in isolated power grid is analyzed based on steady – state Q – V model and electromechanical transient model with consideration of low excitation limit. Finally, the countermeasures to reduce the damage of power – frequency overvoltage are presented. This research is helpful for promoting the security level of the isolated power grid in remote mountainous areas.

Key words:isolated operation; power – frequency overvoltage; Q – V characteristic; low excitation limit; $N-1$ check

0 引 言

四川偏远山区的电网通过长距离交流线路连接,这些地区水电资源丰富,但当地的负荷水平较低。正常情况下,偏远地区电网向主网提供电能。但在某些特殊情况下,例如线路检修、新站投运,或者突发性自然灾害的条件下,地区电网需要保持孤网运行。由于孤网的运行特性存在一些特殊性,且这些地区的电网往往存在设备老旧、备用不足等等

问题,若运行方式、风险防控措施安排不当,极易造成较大事故。因此,研究偏远山区电网孤网的运行特性及风险防控措施是很有必要的。

传统对于孤立电网运行的研究主要侧重于电网的频率稳定问题^[1-2]。对于藏区孤网而言,这些地区的发电机容量和负荷相比比较充裕,频率稳定问题并不突出。然而,由于偏远山区电网通过长距离交流线路相连,线路充电无功较大,导致孤网中易出现工频过电压,机组超出进相能力运行。因此,偏远山区孤网的无功电压特性及过电压风险防控问题应该受到关注。文献[3]研究了偏远

2 孤网无功电压特性分析

算例电网(见图 2)较长时间的孤网运行,需考虑 $N-1$ 风险。由于该电网内联络线路长、充电无功较大,工频过电压问题将成为影响该电网安全稳定的关键因素。因此,合理设置孤网的运行点,包括机组的机端电压和投退的低抗数量,才能使得该孤网的电压运行在安全范围内。

2.1 算例电网结构

该偏远山区孤网由 A 电厂经 220 kV 双回交流线连接到 220 kV 变电站 B,再经 110 kV 双回线连接至 110 kV 变电站 G。整个孤网呈树形结构,在变电站 G 下有少数 35 kV 上网的小水电,但小水电容量和电厂 A 相比显著较小,这些机组的进相能力对抑制主网架的过电压几乎没有帮助。因此,在考虑过电压的问题时,该地区电网可以近似看做一个单机系统。

2.2 小方式下的电压特性

A 电厂开一台机组,B-C 线路投运,小水电全部退出。A 电厂机组机端电压设定为最低值 9.975 kV。该方式下,A 电厂机组由于容量较大,进相能力足够,因此无需退出 B-C 线路。调节此电网电压的手段主要有投切 B 变电站 35 kV 低压电抗器(每组 6 Mvar),以及调节 A 电厂机端电压。下面研究这两种调节手段的效果。

投切低压电抗器对 A 电厂机组进相以及重要节点电压的影响如表 1 所示。投入低压电抗器的情况下,系统中的无功消耗增加,因此需要 A 电厂进相减少以平衡无功。同时无功富余也导致了系统的电压下降。

考虑 B 变电站投入两组低压电抗器情况下,A 电厂机组的机端电压对孤网中重要母线及 A 电厂机组进相的影响如表 2 所示。

可以看出,抬高 A 电厂的机端电压,导致系统电压也随之升高。由于系统呈容性,电压升高导致了网络中无功产生增加。由于孤网系统中其余发电机容量远小于 A 电厂发电机容量,其最终结果是多产生的无功几乎都流向了 A 电厂的机组,增加了 A 电厂机组的进相水平。

可见,对于所研究的这种以单台发电机进相为

表 1 低压电抗器投切对重要母线电压及机组进相的影响

B 变电站 低压电抗器 投入组数	A 电厂机组 无功出力 /Mvar	B 变电站 220 kV 母线 电压/kV	G 变电站 35 kV 母线 电压/kV
0	-27.3	235.6	41.1
2	-11.6	226.2	38.9
3	-6.2	222.6	38.2
4	-0.3	218.6	37.3
3 组低压电抗器, B-C 线路跳闸	11.1	210.7	36.2

表 2 机组机端电压对重要母线电压及机组进相的影响

A 电厂机组 机端电压 /kV	A 电厂机组 无功出力 /Mvar	B 变电站 220 kV 母线 电压/kV	G 变电站 35 kV 母线 电压/kV
10.0	-11.6	226.2	38.9
10.2	-12.0	230.8	39.7
10.4	-12.5	235.3	40.5
10.6	-13.0	239.8	41.2
10.8	-13.5	244.3	42.0
11.0	-14.0	248.8	42.8

主的系统,调高机端电压反而加重了发电机进相水平。这和大电网中的无功电压特性有区别。

2.3 孤网运行下 AVR 和低励限制动态特性分析

根据 1.2 节的发电机低励限制模型,搭建电磁暂态仿真模型,并进行 B 变电站 35 kV 母线故障切除低压电抗器的仿真。分成有低励限制环节和无低励限制环节两种情况对切除低压电抗器后的暂态过电压进行了仿真分析,结果如图 3 所示。

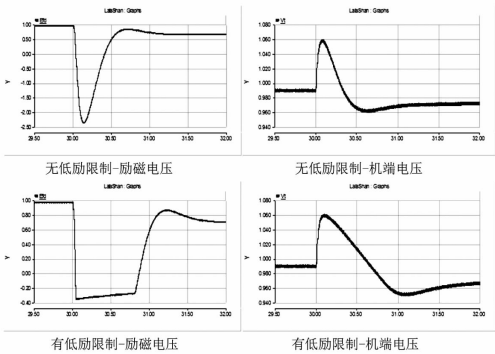


图 3 机组低励限制对孤网过电压的影响

低压电抗器切除后损失无功负荷 18 Mvar,系统无功富余较多,A 电厂发电机超出最大进相深度运行,触发低励限制环节动作。如图 3 所示,低励限制环节动作后,励磁电压 E_f 抬升导致机端电压抬升。由于外部电网呈容性,反而导致发电机进相深度增加。

因此,可以看出在孤网运行时,如果退出机组的低励限制环节,反而可以使得系统获得更好的动态

特性,防止过电压损坏设备。

3 抑制高电压风险的技术措施

针对上节所分析的偏远地区孤网电压特性,综合考虑已有条件,针对该孤立电网,可行的过电压抑制方法如下:

1)合理安排运行方式
选择充电无功少的路径为全网供电,减小孤网中长线路的充电无功,使得投入的低压电抗器也相应减小。此时,在 $N-1$ 损失低压电抗器后,系统富余的无功总量就会减小,从而降低系统的运行风险。

2)低励限制退出运行
由前面理论分析和仿真分析可知,低励限制在某些孤网中不但不会降低发电机进相水平,反而还会加深进相水平,且带来系统的过电压问题。因此,退出低励限制可以使得发电机在孤网运行时获得更好的控制性能和安全性。

3)紧急控制措施
条件允许情况下,考虑35 kV母线故障后的长线路解列措施,可以在发生 $N-1$ 后降低充电无功,将系统电压维持在安全的水平。

4 结 论

前面提出适用于偏远山区电网长期运行的 $N-1$
(上接第9页)

[68] 马艳峰,赵书强,魏清. 基于遗传算法的交直流电力系统稳定器和附加控制器的协调[J]. 电力自动化设备,2004,24(5):75-79.

[69] Hsu X Y, Luor T S. Damping of Power System Oscillations Using Adaptive Thyristor-controlled Series Compensators Tuned by Artificial Neural Networks[J]. IEEE Proceeding - Generation, Transmmission and Distribution, 1999, 146(2):137-142.

[70] Houck C, Joines J, Kay M. A Genetic Algorithm for Function Optimization; A Matlab Implementation [M]. NCSU-IE TR 95-105, 1995.

[71] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

[72] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化,2003,27(4):77-80.

[73] 常勇,李晶,张海燕. 基于广域信号的柔性直流输电

准则,即发生 $N-1$ 故障后的设备安全准则。对于这类有功备用充足的系统,其长期孤网运行最大风险在于 $N-1$ 故障后的过电压问题。在稳态特性上,偏远山区电网的QV特性与大电网有明显区别,抬升机端电压会导致机组进相水平加深;在动态特性上,低励限制的投入对过电压和机组进相均起到恶化的作用。为了有效应对该电网的过电压风险,可以采取合理安排运行方式、退出低励限制以及紧急解列等措施。

参考文献

[1] 叶健忠,邹俊雄,龙霏,等. 地区电网火电机组孤网运行频率控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制. 2012, 40(7):123-128.

[2] 张培高,李兴源,李政. 孤网频率稳定与控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2012, 40(15):143-149.

[3] 滕予非,张华,汤凡,等. 偏远地区小电网与主网解列后高频高压风险及抑制策略[J]. 电力系统保护与控制,2015, 43(1):129-136.

作者简介:

孙昕炜(1991),工程师,主要研究方向为电力系统稳定与控制;
史华勃(1987),工程师,主要研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期:2017-11-15)

附加阻尼控制[J]. 中国电力,2009,42(10):33-38.

[74] 张立奎,张英敏,李兴源,等. 柔性直流附加鲁棒阻尼控制器设计[J]. 现代电力,2015,32(2):70-75.

[75] 郑超,周孝信. 基于普罗尼辨识的VSC-HVDC附加阻尼控制器设计[J]. 电网技术,2006,30(17):25-30.

[76] 马锋,李国杰,阮思烨,等. 基于线性变参数方法的VSC-HVDC变增益附加阻尼控制器设计[J]. 电网技术,2009,33(2):73-77.

作者简介:

郭磊(1990),硕士,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制;
张英敏(1974),博士、副教授、硕士生导师,研究方向为电力系统稳定与控制;
李兴源(1945),博士、教授、博士研究生导师,中国电机工程学会电力系统专委会委员、IEEE高级会员,从事电力系统稳定与控制、高压直流输电研究。

(收稿日期:2017-09-17)

基于调峰及网架约束的新疆电网风电接纳能力研究

宋朋飞¹, 张 锋², 亢朋朋¹, 郭小龙², 樊国伟², 常喜强²
(1. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000;
2. 国网新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要:以新疆电网实际运行中遇到的调峰与新能源出力之间的矛盾为出发点,通过基于极端学习机的预测方法,以调峰能力和电力平衡约束为主要手段,确定新疆电网满足调峰要求的最小开机方式与最大新能源出力的最优解,实现经济调度、智能调度。
关键词:调峰;风力发电;最小开机;极端学习机
中图分类号:TM614 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)01-0014-03

Research on Wind Power Accommodation Capability of Xinjiang Power Grid Based on Peak Shaving and Grid Structure Constraints

Song Pengfei¹, Zhang Feng², Kang Pengpeng¹, Guo Xiaolong², Fan Guowei², Chang Xiqiang²
(1. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830000, Xinjiang, China;
2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., LTD., Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract:Taking the contradictions between load shaving and new energy output encountered in the actual operation of Xinjiang power grid as a starting point, and taking the peaking capability and power balance constraints as the main means, the optimal solutions for the minimum start-up mode and the maximum new energy output to satisfy the requirements of peak shaving in Xinjiang power grid are determined through the prediction methods based on extreme learning machine (ELM) to achieve the economic dispatch and intelligent scheduling.
Key words:peak shaving; wind power generation; minimum start-up; extreme learning machine (ELM)

0 引 言

随着能源的日趋枯竭以及环境问题日益凸显,大力发展可持续性新能源成为必然选择,近年来中国风电得到快速发展,特别是新疆哈密新能源基地风电总量在短短几年间已突破千万千瓦。风电出力的随机性、波动性及间歇性给电网带来巨大风险,同时以燃煤火电为主的新疆电网,供暖期调峰电源本身比较匮乏,风电大规模送出更加剧了系统调峰困难。风电大规模发展与系统调峰造成的新能源受限矛盾已越来越突出^[1-3]。

新疆电网全网总装机 80 GW,其中公用机组 49 GW,风电 20 GW,全疆最大经营口径负荷 11.9 GW。风电负荷特性见图 1、图 2、图 3。风电由于分

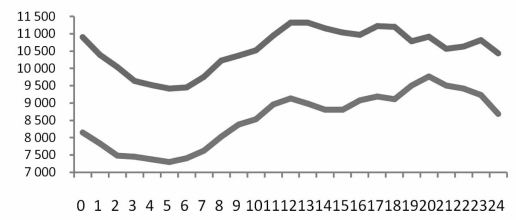


图 1 夏季、冬季日负荷曲线

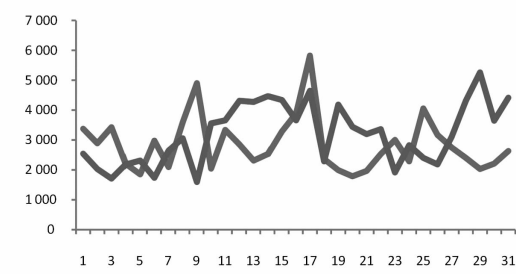


图 2 夏季、冬季风功率波动曲线

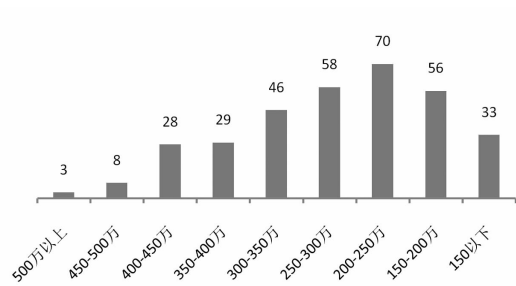


图 3 风电出力波动值区间

散地域广,出力波动性大,对于系统调峰造成较大压力。因此对于风电出力一方面要考虑其在常规能源最小开机方式下的最大值,另一方面要考虑新能源出现大规模波动情况下,常规机组是否具有足够的上调备用容量,保证系统外送组织能力。

下面采用基于极端学习机的风功率及负荷预测手段,对新疆电网最小开机方式及风电出力空间进行平衡预测,对指导实际运行具有重要意义^[4]。

1 极端学习机

极端学习机(extreme learning machine, ELM)是典型的单隐含层前馈神经网络^[5] (single - hidden layer feedforward neural network, SLFNs),如图 4 所示。对于 N 个相互独立的任意样本 (x_i, y_i) ,其中,

$$\begin{aligned} x_i &= [x_{i1} \ x_{i2} \ \cdots \ x_{in}]^T \\ y_i &= [y_{i1} \ y_{i2} \ \cdots \ y_{im}]^T \in R^m \end{aligned} \quad (1)$$

对于含有 1 个隐含层神经元的 SLFN 其数学模型为

$$O_j = \sum_{i=1}^l \eta_i g(\omega_i \cdot x_j + a_i) \quad j = 1, \cdots, N \quad (2)$$

式中: $\omega_i = [\omega_{i1} \ \omega_{i2} \ \cdots \ \omega_{in}]$,为第 i 个隐含层神经元与输入神经元之间的连接权向量; $\eta_i = [\eta_{i1} \ \eta_{i2} \ \cdots \ \eta_{im}]$,为第 i 个隐含层神经元与输出神经元之间的连接权向量; a_i 为第 i 个隐含层神经元阈值; l 为隐含层神经元数目; $g(\cdot)$ 为神经元激发函数; $\omega_i \cdot x$ 为两者的内积。

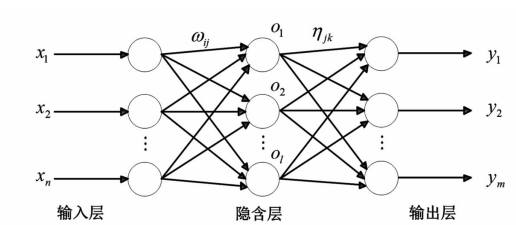


图 4 ELM 的结构示意图

为使训练样本输出误差最小,可以通过令

$$\begin{aligned} \min E &= \sum_{j=1}^l \| o_j - y_j \| = 0 \text{ 得到。} \\ y_j &= \sum_{i=1}^l \eta_i g(\omega_i \cdot x_j + a_i) \quad j = 1, \cdots, N \end{aligned} \quad (3)$$

上述方程可以写成如下形式。

$$\mathbf{H}\boldsymbol{\eta} = \mathbf{Y} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{H}$ 称为神经网络隐含层输出矩阵,

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\omega_1, \cdots, \omega_l, a_1, \cdots, a_l, x_1, \cdots, x_N) &= \\ \begin{bmatrix} g(\omega_1 \cdot x_1 + a_1) & g(\omega_1 \cdot x_1 + a_2) & \cdots & g(\omega_1 \cdot x_1 + a_l) \\ g(\omega_1 \cdot x_2 + a_1) & g(\omega_1 \cdot x_2 + a_2) & \cdots & g(\omega_1 \cdot x_2 + a_l) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g(\omega_l \cdot x_N + a_1) & g(\omega_l \cdot x_N + a_2) & \cdots & g(\omega_l \cdot x_N + a_l) \end{bmatrix}_{N \times l}; \\ \boldsymbol{\eta} &= [\eta_1^T \ \eta_2^T \ \cdots \ \eta_l^T]^T_{l \times m}; \\ \mathbf{Y} &= [y_1^T \ y_2^T \ \cdots \ y_N^T]^T_{N \times m}. \end{aligned} \quad (5)$$

对于 N 个任意样本 (x_i, y_i) ,其中 $x_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ \cdots \ x_{in}]^T \in R^n, y_i = [y_{i1} \ y_{i2} \ \cdots \ y_{im}]^T \in R^m$,一个任意区间可微的激活函数 $g: R \rightarrow R$,则对具有 N 个隐含层神经元的 SLFN,在任意赋值 $\omega_i \in R^n$ 和 $\alpha_i \in R$ 的情况下,其隐含层输出矩阵 $\mathbf{H}$ 可逆且有 $\|\mathbf{H}\boldsymbol{\eta} - \mathbf{Y}\| = 0$ 。

上述证明中指出,如果训练样本和隐含层神经元个数相同,矩阵 $\mathbf{H}$ 就变为可逆方阵,训练样本误差可以近似为 0。但是在大多数情况下,训练样本个数要远远多于隐含层节点数目,此时 $\mathbf{H}$ 为非方阵,因此可能不存在 $\omega_i, \alpha_i, \boldsymbol{\eta}$ 使 $\mathbf{H}\boldsymbol{\eta} = \mathbf{Y}$,这时需要重新寻找一组赋值使误差最小。常用方法是寻找 SLFN 最小范数的最小二乘解:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{H}(\omega_1, \cdots, \omega_l, a_1, \cdots, a_l) \hat{\boldsymbol{\eta}} - \mathbf{Y}\| \\ = \min_{\boldsymbol{\eta}} \|(\omega_1 \cdots, \omega_l, a_1, \cdots, a_l) \boldsymbol{\eta} - \mathbf{Y}\| \end{aligned} \quad (6)$$

其解 $\hat{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{Y}$,式中 $\mathbf{H}^{-1}$ 为广义逆矩阵。

对于给定的 N 个训练样本,隐含层神经元数目为 l ,激活函数为 $g(x)$ 。其基本算法步骤如下:

- 1) 随机选取一组输入权重系数 ω_i 和偏差 $a_i, i = 1, \cdots, l$ 。
- 2) 计算隐含层输出矩阵 $\mathbf{H}$ 。
- 3) 计算输出权重系数 $\boldsymbol{\eta}: \boldsymbol{\eta} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{Y}$ 。

系统正常运行时,若考虑自备电厂全处于自平衡状态,电网的公用有功与负荷始终处于动态平衡状态,则有式(7)成立^[6-7]:

$$P_L + P_w + P_s - \sum_{i=1}^n P_{Gi} = P_{wind} \quad (7)$$

式中: P_L 为经营口径负荷; P_w 为疆电外送功率,包括直流联变下网及交流外送; P_s 为系统损耗;

P_{Gi} 为公用机组出力; P_{wind} 为风电出力。

从上述公式中可以看出,若负荷、损耗、外送保持不变,随着公用机组出力的增加,风电理论出力将随之减小。若想要接纳更多的风电,则需公用机组降低至最小出力。同时,为保证疆电外送能够有效保证,需保证在风电出力最低时,公用机组上备用容量充足。

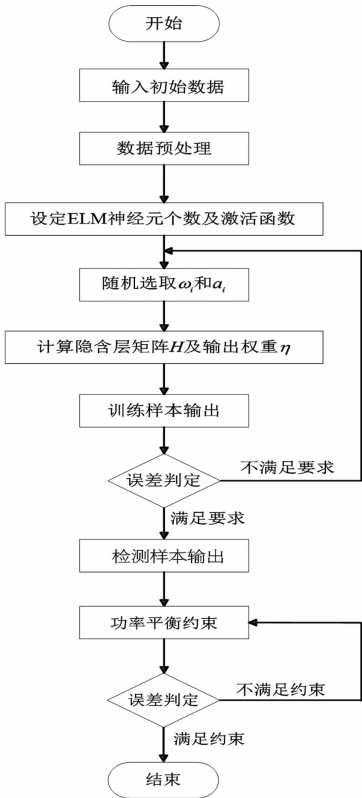


图5 基于ELM的计算流程

如图5所示,选取近3年观测到的风电日最大出力及当日最大功率波动数据、经营口径日最大负荷作为训练输入样本,将预测值作为功率平衡约束条件的初值,进行最小开机方式与新能源出力间的平衡迭代,最终找出两者之间的最优开机比例。

2 新疆电网公用电厂最小开机方式

考虑到新疆电网各断面能力及冬季供热机组开机限制,在确保各断面满足安全稳定约束的前提下,结合各厂前几年的实际运行数据,对非采暖期、采暖期公用机组的最小运行方式进行安排,原则如下:1)非供暖期主要考虑各断面能力限制安全稳定约束及系统出现大幅功率波动后的稳定性;2)供暖期供热机组最小运行方式原则是以热定电,非供热机

组以锅炉低负荷稳燃作为最小运行方式核定依据。将式(7)中的 P_{Gi} 分为夏季和冬季分别进行计算。

3 新疆电网风电最大出力空间

根据新疆电网运行实际情况,2017年±800kV天中直流特高压最大输送功率将继续维持在5000MW,其中联络变压器下网最大能力为3200MW,交流通道最大外送能力为3000MW,预计疆内组织外送最大功率将在5000MW。计算表明,冬季由于供热影响,新疆电网调峰缺额较大,风电因调峰受限较大。按照不同季节机组开机方式及最小出力情况,为避免风电波动造成较大功率缺额,按照风电日功率波动量5000MW考虑。

表1 丰水期风电最大出力空间预测 单位:MW

月份	公用 电厂	疆电 外送	经营口径 负荷	发电 出力	风电 出力
1月	8740	5000	8082	13082	4342
2月	8781	5000	7312	12312	3531
3月	7452	5000	8087	13087	5635
4月	5791	5000	8601	13601	7810
5月	6233	5000	9587	14587	8354
6月	7258	5000	10777	15777	8519
7月	7757	5000	10709	15709	7952
8月	7346	5000	10116	15116	7770
9月	6834	5000	8873	13873	7039
10月	8537	5000	9488	14488	5951
11月	8869	5000	9789	14789	5920
12月	8754	5000	8036	13036	4282

表2 枯水期风电最大出力空间预测 单位:MW

月份	公用 电厂	疆电 外送	经营口径 负荷	发电 出力	风电 出力
1月	7932	5000	8082	13082	5150
2月	7816	5000	7312	12312	4496
3月	6366	5000	8087	13087	6721
4月	5750	5000	8601	12601	7851
5月	5146	5000	9587	14587	9441
6月	5624	5000	10777	15777	10153
7月	7757	5000	10709	15709	9255
8月	7346	5000	10116	15116	9088
9月	6834	5000	8873	13873	8460
10月	8537	5000	9488	14488	7276
11月	8869	5000	9789	14789	6108
12月	8754	5000	8036	13036	4487

根据表1、表2对比可知,新疆电网丰水期和枯水期风电理论最大出力在8500~10000MW之间,新疆电网风电总装机为20000MW,由于调峰受限出力约为50%~60%。通过风功率日系统调节备用容量满足需求可以得到新疆公用电厂最小开机出力为5146MW。

(下转第21页)

核电站无刷励磁系统的电枢电流谐波分析研究

刘 念¹,王贺新²,赵 欣²

(1. 四川大学锦城学院新能源工程系,四川 成都 611731; 2. 四川大学电气工程系,四川 成都 610065)

摘 要:无刷励磁系统是核电站汽轮发电机组的重要组成部分。无刷励磁系统的旋转整流器同转子一起旋转时,旋转整流器由于承受着强离心力的作用会出现各种故障,而不同故障时电枢电流的谐波是不同的。针对六相无刷励磁系统励磁机旋转整流器在正常运行、一臂开路和一臂短路3种情况下的电枢电流谐波进行理论分析,并在 Matlab 中 Simulink 的环境下搭建三相、六相无刷系统进行仿真分析。通过与三相无刷励磁系统进行比较,得出六相无刷励磁系统的故障特征与三相无刷励磁系统相似,三相无刷励磁系统故障检测方法可以用于六相无刷励磁系统。

关键词:无刷励磁系统;旋转整流器;谐波分析;故障诊断

中图分类号:TM31 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)01-0017-05

Analysis on Harmonic of Armature Current for Brushless Excitation System of Nuclear Plant

Liu Nian¹, Wang Hexin², Zhao Xin²

(1. Department of New Energy Engineering, Jincheng College of Sichuan University, Chengdu 611731, Sichuan, China; 2. Department of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract:Brushless excitation system is an important part of turbine-generator unit in nuclear plants. When the rotating rectifier of brushless excitation system rotates with the rotor together, there will be some different failures because the rotating rectifier bears a strong centrifugal force, and the harmonic of armature current of different failures is different. The harmonic of armature current is analyzed theoretically aiming at three conditions, that is, exciter rotating rectifier of six phase brushless excitation system in normal operation, one arm open and one arm to be short circuit. The three-phase and six-phase brushless system are established in Matlab/Simulink for simulation analysis. Through comparing with three-phase brushless excitation system, it is concluded that the fault characteristics of six-phase brushless excitation system are similar to three-phase brushless excitation system. So the fault detection method of three-phase brushless excitation system can be used for six-phase brushless excitation system.

Key words:brushless excitation system; rotating rectifier; harmonic analysis; fault diagnosis

0 引 言

无刷励磁系统是核电站汽轮发电机组的重要组成部分,其基本功能是:向汽轮发电机提供励磁电流;当负载工况变化时,维持机端电压稳定;当电力系统受到扰动时,保持发电机稳定运行;当发电机出现异常工况时,通过励磁调节限制运行工况,保护发电机。它的性能和可靠性直接影响到发电机组和电

网的安全运行和送电能力,是发电机组和电网系统中极其重要的一环^[1]。

无刷同步发电机励磁系统的主励磁机是转枢式同步电机,与转子同轴旋转的电枢绕组感应出的交流电流经与主轴一起旋转的二极管整流后,直接送到主同步发电机的转子励磁绕组。交流主励磁机的励磁电流由同轴的交流副励磁机经过静止的晶闸管整流器后供给。由于这种励磁系统取消了集电环和电刷装置,故称为无刷励磁系统。由于取消了电刷

和集电环,减少了大量的维护工作并消除了因为电刷与集电环的机械性接触摩擦造成的噪声、火花和发热等不安全因素,因此无刷励磁同步电机在大容量核发电机组中得到广泛的应用^[2]。

在实际运行过程中,整流二极管处于高速旋转的状态将承受十分强大的离心力,故发生故障的概率非常高。一旦发生故障,如一臂开路、一臂短路等,将造成二极管的损坏,严重时不能给主发电机提供励磁电流从而影响发电机的正常安全运行,最后可能造成严重的后果。针对无刷励磁系统旋转整流器的故障诊断,国内外做了很多的研究,多数研究的是三相无刷励磁系统和 11 相(或多相)无刷励磁系统,而研究六相无刷励磁系统却很少^[3-6]。

六相无刷励磁系统不仅可以降低大功率励磁系统对单个二极管的容量要求,还能提高整流电压的质量,改善系统的容错性,因此得到了广泛的应用。下面重点对六相无刷励磁系统励磁机旋转整流器在正常运行、一臂开路和一臂短路 3 种工况下进行交流励磁机电枢电流谐波分析,并在 Matlab 中 Simu-link 的环境下进行仿真计算。

1 旋转整流器正常运行时的理论分析

六相无刷励磁同步发电机的主交流励磁机的电枢电流由副交流励磁机经过可控硅整流之后提供,主同步发电机的励磁电流由主交流励磁机经过旋转整流器整流后输出到主同步电机的转子绕组上提供。该旋转整流器所接的负载可以认为是大电感负载,负载电流 I_d 为同步发电机转子励磁电流,其六相无刷励磁同步电机励磁系统接线图如图 1 所示。

带整流器负载的主交流励磁机的电枢电流可以认为是正弦波形,定子电枢每相感应电压均为正弦波,相角依次相差 60° 。但是由于交流励磁机的电枢绕组存在电抗,导致电枢电流不能突变,所以电枢电流是非正弦的,并存在一个换相重叠角 γ 。 U_a 相电枢电流波形如图 2 所示。

为了简化计算,这里忽略电枢绕组的电抗,认为电枢电流是正弦波形,则 U_a 相电枢电流波形如图 3 所示。

图 3 所示的电枢电流在一个周期内的表达式可以用分段函数表示,则交流励磁机的旋转整流器在正常运行时 U_a 相的电枢电流为

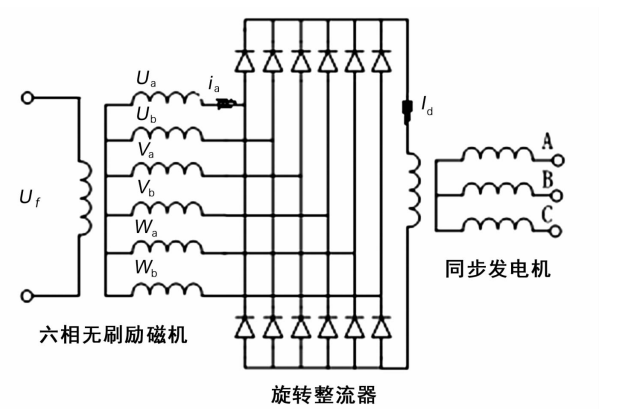


图 1 六相无刷励磁系统接线图

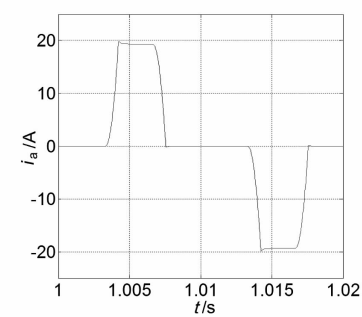


图 2 实际的 U_a 相电枢电流波形

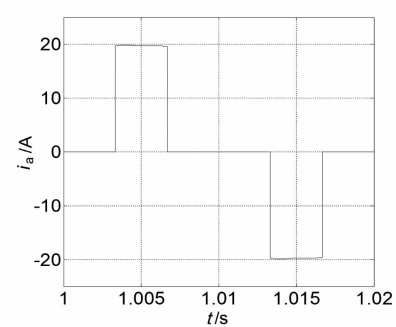


图 3 简化后的 U_a 相电枢电流波形

$$i_a = \begin{cases} I_d & \frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3} \\ -I_d & \frac{4\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{3} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_d 为负载电流。从电枢电流的波形和公式可以看出,电枢电流是周期函数且满足狄利克雷定理,故可以对电枢电流进行傅里叶分解,得到分解后的电枢电流为

$$i_a = \frac{4I_d}{n\pi} \sin n\omega t \quad (n = 1, 3, 5 \cdots) \quad (2)$$

即

$$i_a = \frac{4I_d}{n\pi} \sin n\omega t = \frac{4I_d}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \cdots \right) \quad (3)$$

从电枢电流的傅里叶分解可以看出交流励磁机的旋转整流器在正常运行时电枢电流不含有直流分

量和偶次谐波,仅含有奇次谐波,其中 3 次、5 次和 7 次谐波的含量最多,且谐波含量随着谐波次数的增加而降低。

2 旋转整流器一臂开路时的理论分析

同旋转整流器正常运行时的分析方法一样,为了简化计算,同样忽略电枢绕组的电抗,认为电枢电流是正弦波形,则 U_a 相一臂开路时的电枢电流波形如图 4 所示。

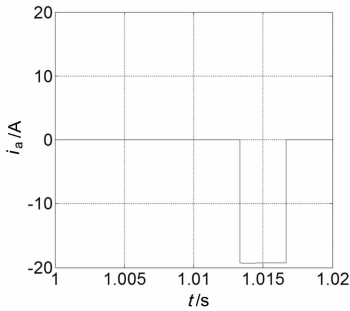


图 4 U_a 相一臂开路时电枢电流波形

图 4 所示的电枢电流同样用分段函数表示,则交流励磁机的旋转整流器在一臂开路时 U_a 相的电枢电流为

$$i_a = \begin{cases} -I_d & \frac{4\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{3} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

可以看出电枢电流还是周期函数并且满足狄利克雷定理,同样在一个周期内的表达式可以用傅里叶分解,得到

$$i_a = \frac{I_d}{6} + \frac{2I_d}{n\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (A + B)$$

$$A = -2\sin \frac{n\pi}{3} \cos n\omega t$$

$$B = \left(\cos n\pi - 2\cos \frac{n\pi}{3} \right) \sin n\omega t \quad (n = 1, 2, \dots)$$

从一臂开路时电枢电流的傅里叶分解可以看出,交流励磁机的旋转整流器在一臂开路时电枢电流不仅含有奇次谐波,还出现了直流分量和偶次谐波,其中 2 次和 4 次谐波含量很多并且谐波含量随着谐波次数增加而降低。

3 旋转整流器一臂短路时的理论分析

用同样的方法来分析整流旋转器在一臂短路时

的电枢电流,则 U_a 相一臂短路时的电枢电流波形如图 5 所示。

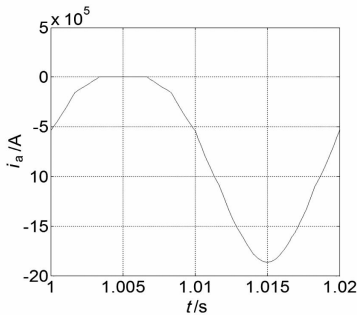


图 5 U_a 相一臂短路时电枢电流波形

图 5 所示的电枢电流波形同样还是周期函数并且满足狄利克雷定理,同样在一个周期内的表达式可以用傅里叶分解,但是由于短路时的电枢电流波形明显不能用一个显函数来表示并且也不易用分段函数来表示。为了简化计算,这里采用 Matlab 拟合工具箱将短路时的电枢电流波形进行了拟合,得到一个拟合函数为

$$i_a = a_1 \sin(b_1 \omega t + c_1) + a_2 \sin(b_2 \omega t + c_2) + a_3 \sin(b_3 \omega t + c_3) + a_4 \sin(b_4 \omega t + c_4) \quad (6)$$

由傅里叶分解可以知道一个非标准正弦函数的分解除了直流分量以外,其奇次偶次谐波含量是随着谐波次数的增加成幂数的减少,可见在短路发生时电枢电流的直流分量和低次谐波的含量较多,如 2 次谐波、3 次谐波等。

4 旋转整流器正常和故障时仿真分析

在 Matlab 中的 Simulink 环境下建立三相、六相无刷励磁系统的仿真模型^[7-8],三相无刷励磁机用 Matlab 的三相同步电机模块来进行仿真,如图 6 所示;六相无刷励磁机采用六相电压源模块进行仿真,如图 7 所示。

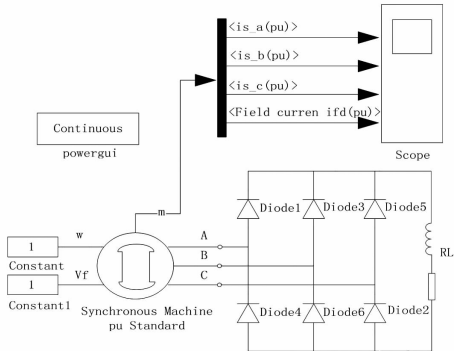


图 6 三相无刷励磁系统的仿真模型

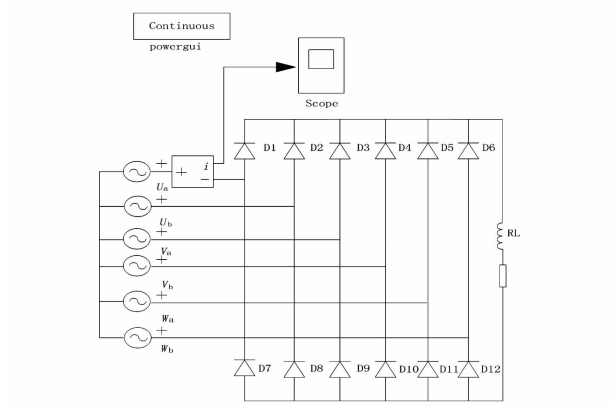


图 7 六相无刷励磁系统的仿真模型

仿真模型中的无刷励磁机参数和同步发电机转子参数如表 1 所示,其中 x_d^* 为励磁机 d 轴电抗标么值; x_q^* 为励磁机 q 轴电抗标么值; r_a^* 为励磁机电枢电阻标么值; x_o^* 为励磁机电枢漏电感标么值; R_L^* 为同步发电机转子绕组阻抗标么值。

表 1 无刷励磁机参数和同步发电机转子参数

无刷励磁	x_d^*	x_q^*	r_a^*	x_o^*	R_L^*
六相系统	1.563	0.921	0.532	0.023	2.563
三相系统	1.236	0.732	0.463	0.015	2.132

通过仿真分析,分别获得三相、六相交流励磁机旋转整流器在正常运行时的电枢电流波形和谐波成分,如图 8 和图 9 所示。而图 10 和图 11 分别是三相、六相交流励磁机旋转整流器发生一臂开路时的电枢电流波形和谐波成分。另外,图 12 和图 13 分别是三相、六相交流励磁机整流器发生一臂短路时电枢电流的波形和谐波成分。

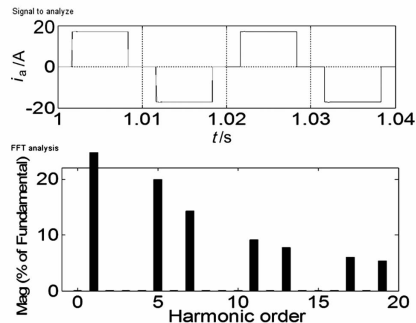


图 8 正常运行时 U_a 相电枢电流波形和谐波(三相)

从仿真结果可以看出,六相无刷励磁系统励磁机旋转整流器在正常运行、一臂开路和一臂短路三种情况下,电枢电流的谐波次数和含量与三相无刷励磁系统励磁机旋转整流器在正常运行、一臂开路和一臂短路 3 种情况下基本相同。出现不同的地方在于旋转整流器正常运行时,三相励磁系统中的电

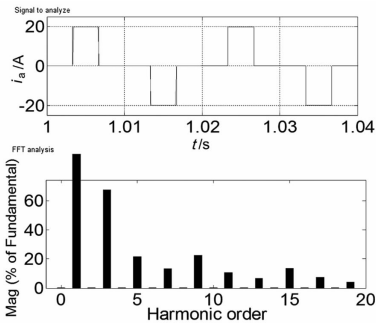


图 9 正常运行时 U_a 相电枢电流波形和谐波(六相)

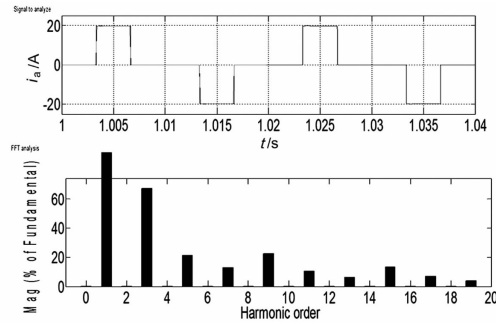


图 10 一臂开路时 U_a 相电枢电流波形和谐波(三相)

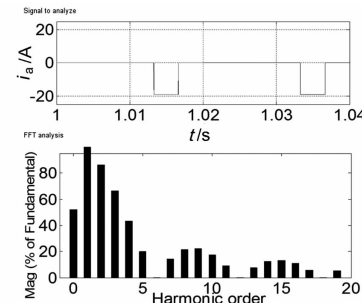


图 11 一臂开路时 U_a 相电枢电流波形和谐波(六相)

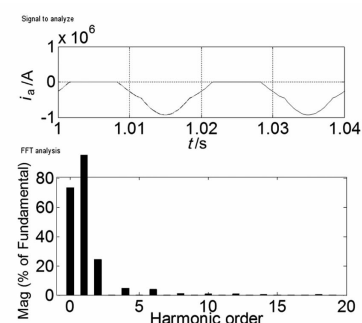


图 12 一臂短路时 U_a 相电枢电流波形和谐波(三相)

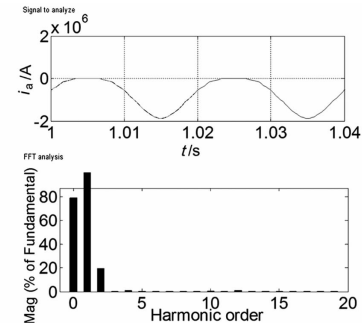


图 13 一臂短路时 U_a 相电枢电流波形和谐波(六相)

枢绕组是星型连接,故3次及3的整数倍谐波不存在,而对于六相励磁系统则是6次及6的整数倍谐波不存在。但是总体的故障特征并没有改变,例如:正常运行时奇次谐波含量较多;一臂开路时直流分量、基波和2次、4次谐波含量较多;一臂短路时直流分量、基波和2次谐波含量较多。

因此,根据励磁机转子侧出现不对称电流可以在励磁机定子侧感应出相应的谐波电流的原理,可在定子侧进行谐波电流的成分检测(例如正常运行时6次谐波含量最大、一臂开路时基波含量最大、一臂短路时2次谐波含量最大)达到故障诊断目的,或者检测定子侧电流基波含量与6次谐波含量的比值、基波含量与2次谐波含量的比值作为故障类型的判断。

5 结 语

针对六相无刷励磁系统励磁机在正常运行、一臂开路和一臂短路3种情况下对电枢电流进行谐波理论分析和仿真计算,得出仿真结果与理论分析一致;与三相无刷励磁系统进行了比较,得出六相无刷励磁系统的故障特征与三相相似,三相无刷励磁系统故障检测方法可以用于六相无刷励磁系统。

参考文献

[1] 赵昌宗. 岭澳核电发电机用无刷励磁机的技术特点 (上接第16页)

4 结 语

以新疆电网实际运行中遇到的调峰与新能源出力之间的矛盾为出发点,通过基于极端学习机的预测方法,以调峰能力和电力平衡约束为主要手段,确定新疆电网满足调峰要求的最小开机方式与最大新能源出力的最优解,为新疆电网明确开机方式,实现经济调度奠定基础。

参考文献

[1] 魏磊,张琳,姜宁,等. 包含风电的电力系统调峰能力计算方法探讨[J]. 电网与清洁能源,2010,26(8):59-63.
[2] 闫广新,施海,刘新刚,等. 电网在调峰能力约束下接纳风电能力的估算[J]. 电力与能源,2012,33(3):260

[C]. 中国电机工程学会大电机专业委员会学术年会, 2009.
[2] 鲁勇勤. 广东岭澳二期1 150 MW 核电发电机无刷励磁系统[J]. 东方电机, 2009,15(5): 42-47.
[3] 刘念,曾德纯,谢应璞,等. 交流励磁机旋转整流器故障的微机识别快速报警装置研究[J]. 电气应用, 1993,10(1):11-13.
[4] 刘念. 无刷励磁旋转整流器电流波形分析及其故障的微机识别[J]. 电力系统自动化,1994,18(4):19-26.
[5] Zouaghi T, Poloujadoff M. Modeling of Polyphase Brushless Exciter Behavior for Failing Diode Operation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1998, 13(3): 214-220.
[6] Xiao C J, Li Q F, Lai J S, et al. Analysis of Polyphase Brushless Exciter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(6): 1720-1726.
[7] 郝亮亮,王善铭,邱阿瑞,等. 多相无刷励磁系统励磁机定子电流谐波特性[J]. 清华大学学报(自然科学版),2011,51(1):58-62.
[8] 郝亮亮,王善铭,邱阿瑞,等. 多相无刷励磁系统旋转整流器故障的仿真与识别[J]. 电工技术学报,2012, 21(4):138-144.

作者简介:

刘念(1956),博士、教授,主要从事高电压技术及电力设备状态监测与故障诊断等方面的教学与研究;
王贺新(1989),硕士研究生,研究方向为电力设备故障与诊断;
赵欣(1992),硕士研究生,主要从事大电机安全分析与运行监控技术研究。

(收稿日期:2017-10-18)

-263.
[3] 张学清,梁军,张熙,等. 基于样本熵和极端学习机的超短期风电功率组合预测模型[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):33-39.
[4] 武峰雨,乐秀璠,南东亮. 相空间重构的极端学习机短期风速预测模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013,25(1):136-141.
[5] 刘士荣,李松峰,宁康红,等. 基于极端学习机的光伏发电功率短期预测[J]. 控制工程,2013,20(2):372-376.
[6] 刘德伟,黄越辉,王伟胜,等. 考虑调峰和电网输送约束的省级系统风电消纳能力分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):77-81.
[7] 李子寿,许梁,徐箭,等. 以调峰能力为约束的湖北电网接纳风电能力研究[J]. 机电工程,2016,33(5):625-628.

作者简介:

宋鹏飞(1987),硕士研究生,主要从事电力系统控制与分析。
(收稿日期:2017-09-08)

单极接地故障下融冰装置的运行 风险评估及对策研究

李 训¹,徐 琳²,丁理杰²

(1. 国网四川省电力公司,四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘要:对于交流侧通过换相电抗器接入变电站母线而未通过变压器隔直的直流融冰装置,当融冰线路发生单极接地时直流正负极电压不对称,该直流电压分量通过六脉动整流阀直接耦合注入交流电网,引发中性点电压大幅度偏移,严重时将导致PT饱和甚至熔丝熔断。这里评估了不同融冰方式下单极接地故障下直流融冰装置的运行风险,揭示了PT饱和及熔丝熔断的机理,结合现场实际运行情况改进了现有融冰装置直流单极对地保护控制策略,并通过电磁暂态仿真建模验证了该对策的可行性。结果表明,所提出的方法能够有效地降低直流单极接地故障下直流融冰装置的运行风险,具有较好的实用性。

关键词:直流单极接地;PT饱和;直流融冰装置;中性点电压偏移

中图分类号:TM721 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)01-0022-05

Risk Assessment and Countermeasures for De-icing Devices under Unipolar DC Fault Condition

Li Xun¹, Xu Lin², Ding Lijie²

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

Abstract: The de-icing devices are normally connected to the AC substation using the commutation inductance, instead of isolation transformers, which results in DC voltage coupling of the SCR converters to the AC networks under unipolar DC fault condition, thus causing significant neutral point voltage deviations, saturation of potential transducers (PTs) and breakdown of fuses. The risk assessment of different de-icing methods is presented, and the mechanism of PT saturation and fuse breakdown are revealed. Based on the practical operation conditions, the protection and control strategies of the existing de-icing devices are analyzed and significantly enhanced. The effectiveness of the proposed strategy has been validated by the electromagnetic transient simulation results, and the operation risk under unipolar DC faults can be remarkably reduced, which can be widely applied in the practical applications of de-icing devices.

Key words: unipolar DC fault; potential transducer (PT) saturation; DC de-icing device; neutral point voltage deviation

0 引言

目前,直流电流融冰法和过电流融冰方法是最为成熟可行的两种融冰手段。其中直流电流融冰法由于不受线路交流电抗的影响,所需电源容量能够大大降低^[1-3]。该方法将覆冰线路作为负载,施加直流电源,用较低电压提供短路电流加热导线使覆

冰融化,一般采用发电机电源整流和采用系统电源的可控硅整流两种方案^[4-6]。前者虽可减少投资但却受发电机组容量与融冰所需容量的限制,大多情况都不满足需求;因此采用系统电源的可控硅整流融冰是直流融冰方法中的热点,其适用性更强,可根据不同情况调节直流融冰电压,使之满足不同应用环境的需要,是现有融冰方法中最理想的一种^[7-10]。

下面对不同融冰方式下单极接地故障下直流融冰装置的运行风险进行评估,揭示 PT 饱和及熔丝熔断的机理,结合现场实际运行情况提出改进现有融冰装置直流单极对地保护控制策略,并通过电磁暂态仿真建模验证所提对策的可行性。

1 直流融冰装置在直流单极接地故障下的运行风险

1.1 直流单极接地故障下融冰装置的运行风险

目前直流融冰装置主要有两种拓扑结构:一是通过整流变压器和整流装置带线路融冰,当直流单极接地故障时可通过整流变压器实现两侧系统的电气隔离;二是通过换相电抗器和 6 脉动整流装置带线路融冰,如图 1 所示,下面主要讨论这种拓扑结构融冰装置的运行风险。

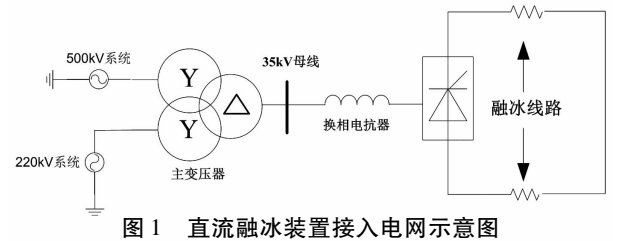


图 1 直流融冰装置接入电网示意图

目前,图 1 所示直流融冰装置的融冰工作模式主要有 1-1 和 1-2 型两种融冰模式。其中 1-1 型融冰模式的切换过程如图 2 所示,设单相线路融冰的周期时间为 T ,三相线路融冰时间约为 $1.5T$ 。对于 AC 相融冰方式,WPQ11、WNQ11 闭合,AC 相融冰时间为 $T/2$;对于 BC 相融冰方式,WPQ12、WNQ11 闭合,BC 相融冰时间为 $T/2$;对于 AB 相融冰方式,WPQ11、WNQ12 闭合,AB 相融冰时间为 $T/2$ 。

1-2 型融冰模式的切换过程如图 3 所示,三相线路融冰时间约为 $2T$ 。对于 AB-C 融冰方式,WPQ11、WPQ12、WNQ11 闭合,AB 并联及 C 相融冰时间为 $2T/3$;对于 BC-A 融冰方式:WPQ11、WNQ11、WNQ12 闭合,BC 并联及 A 相融冰时间为 $2T/3$ 。

由于在 1-2 型融冰工作模式下线路总的直流电阻较小,所要求的直流融冰电源的功率相对较小,与 1-1 型融冰工作模式相比较总容量减小约 1/4。1-2 融冰模式可选择作为较长线路的融冰工作模式。

当发生直流单极接地故障时,直流正负极电压不对称,该直流电压分量通过六脉动整流阀直接耦

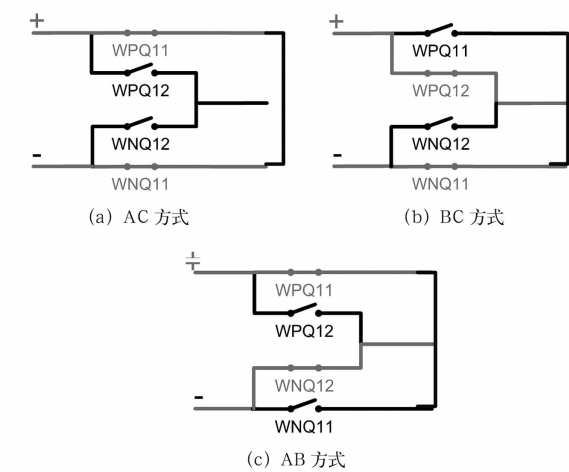


图 2 1-1 型融冰模式

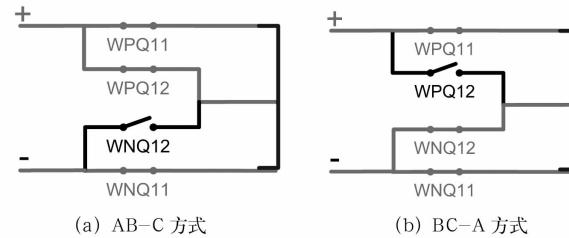


图 3 1-2 型融冰模式

合注入交流电网,引发交流侧中性点电压大幅度偏移,存在较大的运行风险。

图 4 给出了采用 1-1 型融冰模式、融冰电流达到 4 000 A 时对 340 km 的 500 kV 线路进行融冰的仿真结果。在 $t=20$ s 时刻设置融冰线路 B 相近融冰装置接入变电站侧发生单相永久金属性接地故障。不难看出,当 $t<20$ s 时,融冰装置直流正负极对地电压上下对称,发生故障后直流正极对地平均电压 U_{dcP} 升高至 30 kV,直流负极对地平均电压 U_{dcN} 约为 0,导致中性点对地平均电压 U_{dc0} ($U_{dc0} = (U_{dcP} + U_{dcN})/2$)

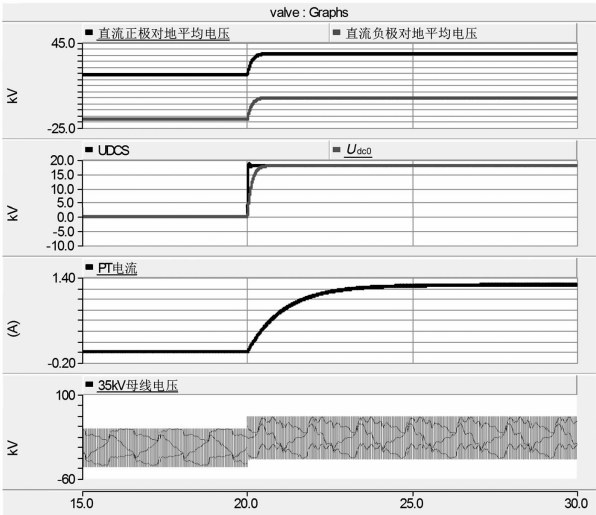


图 4 1-1 型模式下直流融冰线路 B 相近融冰装置接入站侧发生单相接地时的仿真波形

$+U_{dcN})/2)$ 从 0 升高至 18.06 kV,该直流分量通过整流阀、换相电抗器耦合至 35 kV 交流母线 (UDCS),导致电磁式母线电压互感器流过的直流电流达到 1.26 A。直流电流流经母线 PT 一次绕组,一方面将引起 PT 不对称饱和,从而使得测量不准;另一方面,按照 35 kV PT 熔丝的熔断电流通常设定为 0.5 A 进行计算,该直流电流已足以导致 PT 熔丝熔断。

类似地,图 5 给出了采用 1-2 型融冰模式、融冰电流达到 4 000 A 时在同一点发生单极接地故障时的仿真波形。发生故障后流过 PT 的电流达到 1.1 A,直流侧中性点对地电压和交流电压的直流分量达到为 15.78 kV。

目前,当直流线路接地故障引起直流单极接地电压超过其定值时,直流单极对地保护启动,但是直流单极对地保护仅触发故障告警,不触发阀闭锁和断路器跳闸,交流系统也缺乏针对直流电流的保护,存在较大的运行风险。

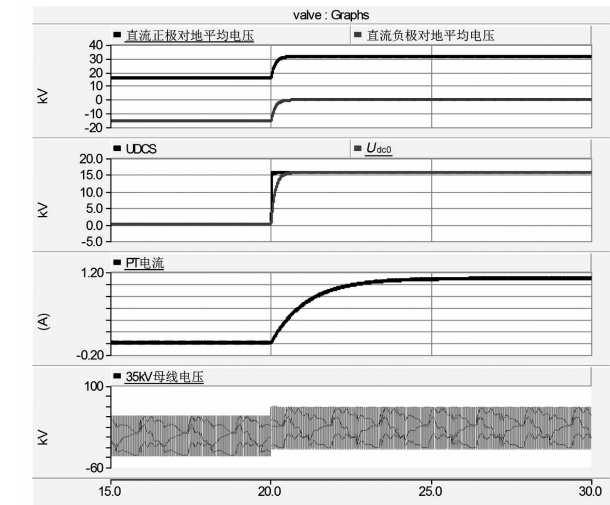


图 5 1-2 型模式下直流融冰线路 B 相近融冰装置接入站侧发生单相接地时的仿真波形

1.2 融冰线路不同位置发生单相接地故障时风险量化计算

由于直流融冰大多采用 1-2 型模式,因此以下分析均建立在 1-2 型融冰模式基础上。在直流融冰时,直流正极对地平均电压 U_{dcP} 和负极对地平均电压 U_{dcN} 主要与融冰线路的等效电阻有关,假设单相线路的电阻为 R ,图 6 分别考虑一去两回融冰模式下,在融冰线路不同点发生单相接地故障时直流侧等效示意图。以 A-BC 方式为例,当 A 相某点发生故障时,故障点与直流正极之间的线路电阻为 X ,

如图 6(a)所示;同理当 B 相某点发生故障时,故障点与直流负极间的线路电阻为 X ,如图 6(b)所示。

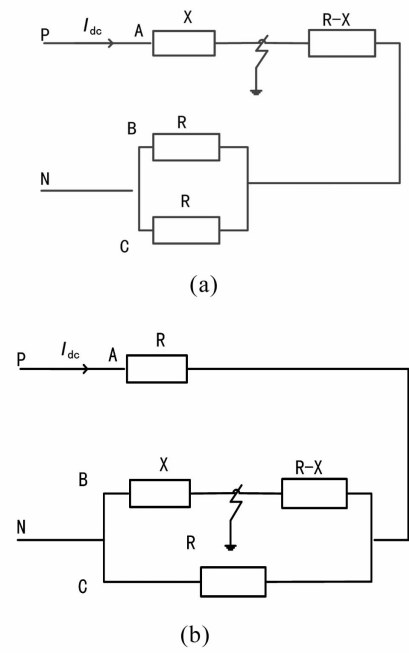


图 6 一去两回融冰方式下在融冰线路不同位置发生单相接地时的直流侧等效示意图

因此,当线路 A 相发生单相接地故障时,直流正极、负极对地平均电压 U_{dcP} 和 U_{dcN} 分别为

$$\begin{cases} U_{dcP} = I_{dc} \cdot X \\ U_{dcN} = I_{dc} \cdot [(R - X) + 0.5R] = I_{dc} (1.5R - X) \end{cases} \quad (1)$$

正负极对地电压平均值的绝对值之差为

$$|U_{dcP}| - |U_{dcN}| = (2X - 1.5R)I_{dc}, 0 \leq X \leq R \quad (2)$$

由此说明,正负极对地电压平均值的绝对值之差在 $[-1.5RI_{dc}, 0.5RI_{dc}]$ 之间变化。当线路 B 或 C 相发生接地故障时, U_{dcP} 和 U_{dcN} 分别为

$$\begin{cases} U_{dcP} = I_{dc} (1.5R - 0.5X^2/R) \\ U_{dcN} = I_{dc} (X - 0.5X^2/R) \end{cases} \quad (3)$$

正负极对地电压平均值的绝对值之差为

$$|U_{dcP}| - |U_{dcN}| = (1.5R - X)I_{dc}, 0 \leq X \leq R \quad (4)$$

可以看出,其值在 $[0.5RI_{dc}, 1.5RI_{dc}]$ 变化。

根据上述推导,图 7 给出了当融冰电流为 4 000 A、融东天线时在线路不同位置发生故障时正负极对地电压平均值的绝对值之差的变化范围。可以看出,随着故障点位置的变化,对地电压绝对值之差分别在 $-31.54 \sim 10.51$ kV、 $10.51 \sim 31.54$ kV 之间变化。

从式(2)、式(4)并结合图 7 看出,直流正负极对地电压平均值绝对值之差的最小值 U_{min} 和最大值

$U_{\max}$ (不计正负) 分别为 $0.5RI_{\text{dc}}$ 和 $1.5RI_{\text{dc}}$, 最大值点出现在直流正极或负极处。

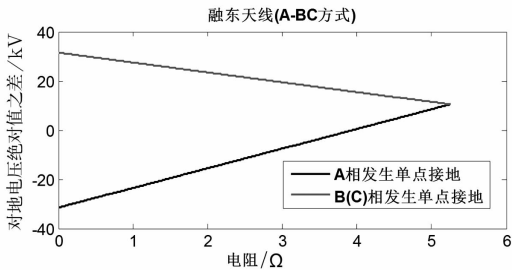


图 7 当直流融冰电流为 4 000 A 时融东天线时正负极对地电压平均值绝对值之差随故障点变化的曲线

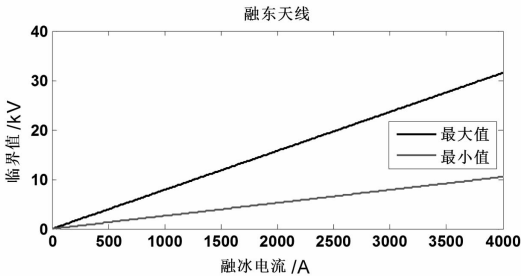


图 8 直流正负极对地电压平均值绝对值之差最小值、最大值与融冰电流的关系曲线

图 8 则给出了融东天线时 $U_{\min}$ 和 $U_{\max}$ 随融冰电流变化的关系曲线。按照 35 kV PT 熔丝熔断电流为 0.5 A, 并考虑到一定的裕度, 即根据 35 kV PT 一次侧电流达到 0.2 A 时的临界电压 U_{lim} 来确定发生直流单极接地闭锁时晶闸管阀触发脉冲的启动条件。当 $U_{\max} > U_{\text{lim}}$ 时即启动闭锁晶闸管阀触发脉冲, 反之当 $U_{\max} \leq U_{\text{lim}}$ 时, 则继续融冰, 也即是说只要在某融冰电流下 $U_{\max} \leq U_{\text{lim}}$, 则 $U_{\min} \leq U_{\text{lim}}$ 肯定满足; 若 $U_{\max} > U_{\text{lim}}$, 则在该融冰电流下线路上某点发生单点故障则会引起 PT 一次侧电流超过 0.2 A。

进一步地, 在 PSCAD 直流融冰模型的基础上搭建 35 kV PT 模型, 设置不同的融冰电流, 在东天线路 B 相东坡站出口处设置单相接地故障(因为该点对应的直流正负极对地电压平均值绝对值之差最大), 检测 35 kV PT 一次侧电流, 仿真结果如表 1 所示。相应地, 图 9 给出了正负极对地电压平均值绝对值之差与 PT 一次侧电流的关系曲线, 通过曲线拟合结果得知, 当绝对值之差为 6.22 kV 时, PT 一次侧电流为 0.2 A, 对应的直流融冰电流为 788 A。

从上述分析看出, 当直流正负极对地电压平均值的绝对值之差小于 6.22 kV, PT 一次侧电流都不会大于 0.2 A (PT 饱和电流为 0.5 A, 考虑一定的裕度), 因此设置直流单极接地保护定值为 6.22 kV,

表 1 不同融冰电流下在东天线路 B 相东坡站出口处发生单相接地故障时 PT 电流		
融冰电流 /A	正负极对地电压平均值 的绝对值之差 /kV	PT 一次侧电流 /A
600	4.73	0.150
700	5.52	0.180
750	5.91	0.195
800	6.31	0.207
900	7.10	0.231
1 000	7.88	0.260
1 100	8.67	0.290
1 200	9.46	0.320
1 300	10.25	0.340
2 000	15.77	0.630

为保证交流侧 PT 的安全运行, 将保护动作修改为闭锁晶闸管阀, 停止融冰。

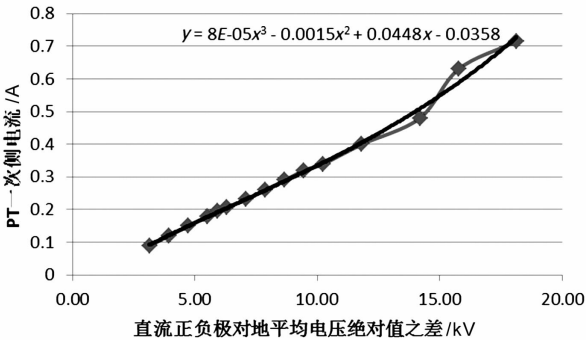


图 9 直流正负极对地电压平均值绝对值之差与 PT 一次侧电流的对应关系及拟合曲线

2 防止直流融冰启动过程误动作对策

考虑到直流融冰装置启动过程中可能出现一定的冲击电流和直流电压调整过程, 需要确保直流单极接地保护在融冰装置启动阶段不会误动作, 因此对直流融冰启动阶段进行仿真核实。

融冰启动电流 设定目标值 /A	直流正负极对地 电压平均值绝对 值之差最大值 /kV	PT 一次侧电流 最大值 /A
788	1.95	0.017
1 000	2.49	0.021
2 000	4.90	0.041
2 500	5.87	0.050
2 750	6.39	0.053
3 000	6.99	0.058

表 2 给出了设定不同融冰启动电流目标值、融冰线路无任何单相接地的正常启动过程中直流正负极对地平均值的绝对值之差最大值和 PT 一次侧电流最大值。图 10 和 11 分别给出了设置目标融冰电流为 788 A 和 2 750 A 时融冰装置在融冰线路无单相接地故障时的启动过程仿真结果。

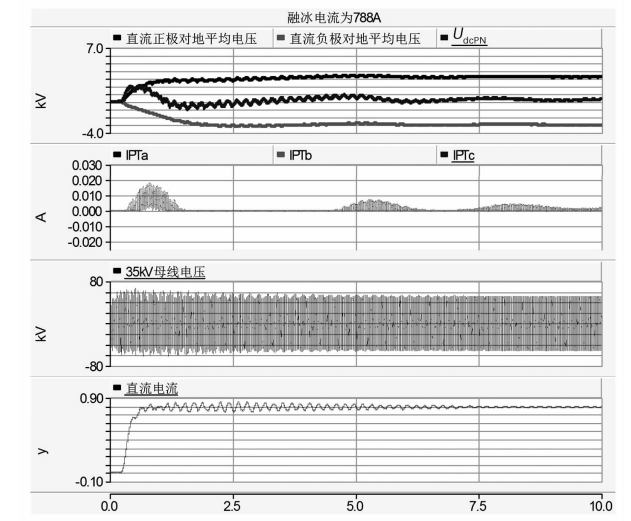


图 10 直流融冰装置在融冰线路无单相接地时的正常启动过程(设置目标融冰电流为 788 A)

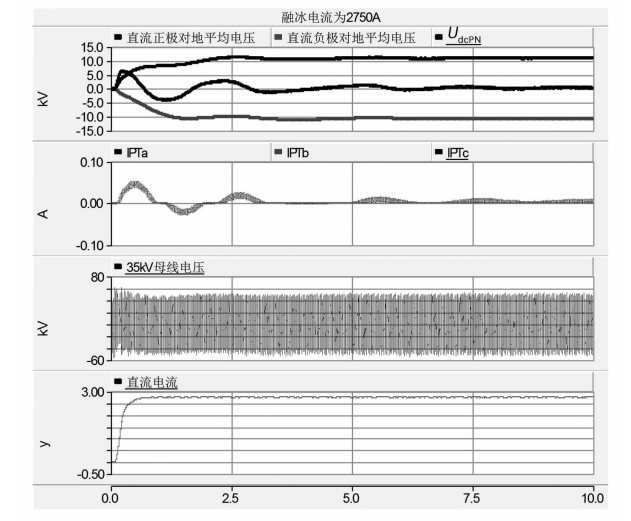


图 11 直流融冰装置在融冰线路无单相接地时的正常启动过程(设置目标融冰电流为 2 750 A)

结果表明,当设定融冰电流目标值大于等于 2 750 A 时,在启动过程中直流正负极对地电压平均值绝对值之差的最大值超过 6.22 kV,尽管 PT 一次侧电流并未超过 0.2 A,但已满足融冰电流大于 788 A 且直流正负极对地电压平均值的绝对值之差大于 6.22 kV 的条件,从而导致直流融冰装置单极接地保护动作。因此,为了避开直流融冰启动过程单极

接地保护的误动作,融冰装置的启动电流应远小于 2 750 A,待装置启动流程完成后再增加融冰电流设定值,确保融冰装置的正常启动。

另一方面,在启动过程中若融冰线路已发生单极接地,只要达到单极接地保护的条件也应正确动作,图 12 给出了融冰电流目标值为 788 A 时东天线 B 相东坡站出口处发生单相接地时的启动过程仿真波形,这个过程已达到直流融冰装置单极接地保护动作条件,单极接地保护正确动作。

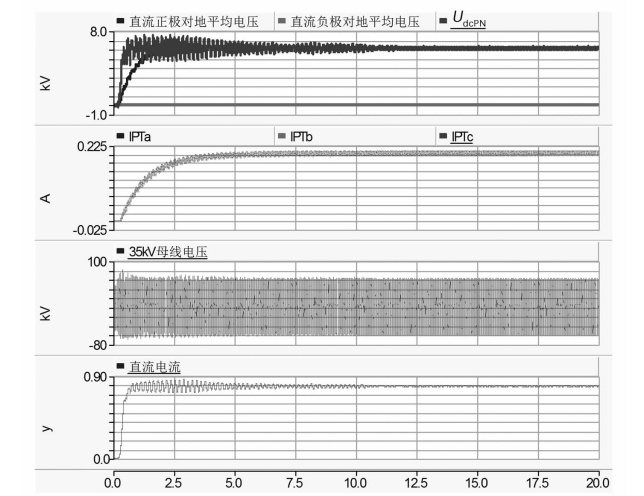


图 12 直流融冰装置在融冰线路发生单相接地时的启动过程(设置目标融冰电流为 788 A)

综上所述,按照 35 kV PT 熔丝的熔断电流为 0.5 A,并考虑到一定的裕度,建议 PT 一次电流达到 0.2 A 时即启动单极接地保护。经过公式推导和仿真校验,建议东坡站直流融冰装置单极接地保护修改方案为:当直流电流大于 788 A 且直流正负极对地电压平均值的绝对值之差大于 6.22 kV 时,直流单极接地保护动作,动作逻辑修改为闭锁晶闸管触发脉冲;同时为了防止融冰装置启动阶段的误动作,融冰装置在启动过程中的融冰电流设定值应远小于 2 750 A,建议启动融冰电流设定值小于 1 000 A,确保融冰装置能够正常启动。

3 结 语

上面评估和量化了不同融冰方式下单极接地故障时直流融冰装置的运行风险,揭示了 PT 饱和及熔丝熔断的机理,并结合现场实际运行情况提出了现有融冰装置直流单极对地保护改进措施,并通过

(下转第 30 页)

输电网分布电容对负序方向元件的影响及对策研究

王云昊,刘宪棚,吴 杰
(国网天津城西供电分公司,天津 300113)

摘要:分布电容会对电力系统的正常运行产生影响。详细分析了输电网中分布电容对负序方向保护的影响机理,研究表明低电压的输电网中线路分布电容对负序方向元件的影响较大。针对分布电容可能导致负序方向元件误动的情形,提出了一种新的基于正序基波电流幅值变化趋势的解决措施。大量的 PSCAD/EMTDC 仿真实验验证了结论的正确性。

关键词:输电网;分布电容;负序方向元件;正序电流

中图分类号:TM773 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)01-0027-04

Effect of Distributed Capacitance in Transmission Network on Negative Sequence Directional Element and Its Countermeasure

Wang Yunhao, Liu Xianxu, Wu Jie
(State Grid Tianjin Chengxi Electric Power Company, Tianjin 300113, China)

Abstract:The distributed capacitance has effect on the stability of power system. The effect mechanism of distributed capacitance on negative sequence directional element is analyzed in detail. The analysis results show that the distributed capacitance will have a greater effect on negative sequence directional element when the transmission voltage decreases. Then, a novel countermeasure based on the change trend of positive sequence fundamental current is presented. A lot of simulations with PSCAD/EMTDC prove these conclusions to be correct.

Key words:transmission network; distributed capacitance; negative sequence directional element; positive sequence current

0 引言

根据电压等级的不同,电网一般分为配电网和输电网。现阶段研究表明,无论是输电网还是配电网,相与相、相与地之间都存在分布电容。由于配电网电压等级较低,分布电容较小,因此配电网中一般不考虑分布电容的影响。但随着电压等级的升高,分布电容越来越大,分布电容就不能忽略^[1]。

经典继电保护原理一般基于工频量,特别是正序工频量。但随着电力网络的不断发展,基于正序量保护存在灵敏度不足问题。因此基于其他序分量的保护得到了大量的应用^[2]。

为了增强特高压输电能力,一般在线路上接入串补装置,因此相关学者研究了串补装置对相应保护的影响^[3-5]。事实上,特高压本身较大的分布电容,同样会对继电保护产生影响^[6]。文献[7]从线

路两侧负序电流相位的角度研究了特高压分布电容对负序方向保护的影响,并提出了一种基于精准贝瑞龙模型的解决措施。文献[8]基于仿真验证的手段分析了特高压分布电容对负序方向元件的影响,但并未提出应对措施。

下面从负序方向保护的工作原理出发,详细分析了分布电容对负序方向元件的影响。分析表明,在考虑分布电容的输电网中,随着电压等级的提高,分布电容对负序方向元件的影响就会降低。针对分布电容可能导致负序保护误动的工况,提出了一种基于正序电流幅值变化趋势的解决措施。仿真结果验证了分析结论的正确性。

1 分布电容对负序方向元件的影响机理研究

1.1 负序方向元件工作原理

图1是典型的输电网双端电源系统示意图,其中: E_M 、 E_N 表示两端系统电动势; Z_{M2} 、 Z_{N2} 分别表示两侧系统的负序阻抗; L 表示输电线路; i_{m2} 、 i_{n2} 、 u_{m2} 、 u_{n2} 分别表示流过M、N两侧保护安装处的负序电流和电压; k 表示内部故障; k_1 表示外部故障。

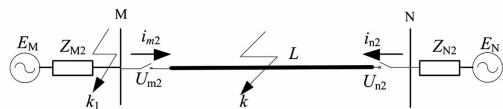


图1 典型双侧电源系统图

当 k 点发生故障时,M侧负序电压和电流存在如下关系:

$$-Z_{M2} \dot{I}_{m2} = \dot{U}_{m2} \quad (1)$$

当 k_1 点发生故障时,M侧负序电压和电流存在如下关系:

$$(Z_{L2} + Z_{N2}) \dot{I}_{m2} = \dot{U}_{m2} \quad (2)$$

式中, Z_{L2} 表示线路L的负序阻抗。

由式(1)、式(2)可以得出M侧在区内、外部故障时电压和电流的相量关系图,如图2所示。图2中, φ_K 表示线路阻抗角,一般约为 80° ^[1],因此在一般分析中,认为电抗值远大于电阻值,即 $\varphi_K \approx 90^\circ$ 。

由图2可以看出,内部故障时,保护安装处的负序电压滞后负序电流约 90° ;而外部故障时,负序电压超前负序电流约 90° 。考虑测量误差、过渡电阻等因素影响时的负序方向元件的判别式为

$$\begin{cases} \arg \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \in (-180^\circ, 0^\circ) & \text{内部故障} \\ \arg \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \in (0^\circ, 180^\circ) & \text{外部故障} \end{cases} \quad (3)$$

下面将重点分析考虑分布电容时对负序方向保护的影响。

1.2 分布电容对负序方向元件的影响机理

在输电网中,分布电容较大,一般不能忽略,为此将图1中线路L进行T型等值,同时假定线路发生了外部故障,图3给出了在此工况下等效负序网络图,图中: k_1 表示故障点; C 表示分布电容; i_{c2} 表示流过分布电容的负序电流; U_{k2} 表示故障点处负序电压源。

由图3可知,对于M侧负序方向元件存在

$$\dot{U}_{m2} = -Z_{m2} \dot{I}_{m2} \quad (4)$$

显然此时M侧负序方向元件根据式(3),判为

正方向,但对于N侧,存在

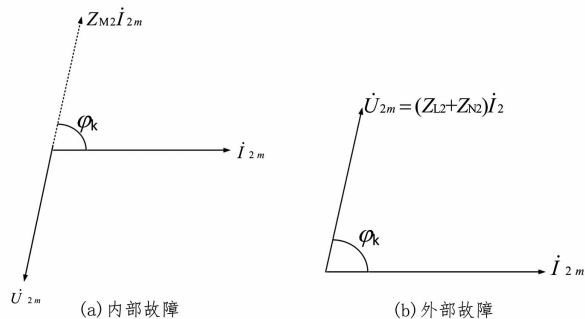


图2 不同故障时负序元件相量图

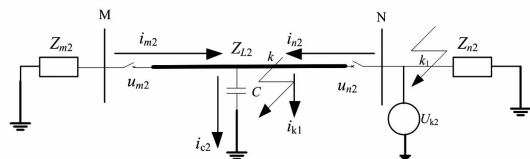


图3 负序网络图

$$\left[\frac{(0.5Z_{L2} + Z_{m2}) \cdot \frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + 0.5Z_{L2} + Z_{m2}} + 0.5Z_{L2} \right] \dot{I}_{n2} = \dot{U}_{n2} \quad (5)$$

为了便于分析,假定全系统中电抗分量远大于电阻分量,并令 $1/\omega C = X_c$,则式(5)进一步化简为

$$\left[j0.5X_{L2} - j \frac{X_c(0.5X_{L2} + X_{m2})}{(0.5X_{L2} + X_{m2} - X_c)} \right] \dot{I}_{n2} = \dot{U}_{n2} \quad (6)$$

令 $A = j0.5X_{L2} - j \frac{X_c(0.5X_{L2} + X_{m2})}{(0.5X_{L2} + X_{m2} - X_c)}$,显然存在

在如下两种情形:

$$1) |0.5X_{L2}| > \left| \frac{X_c(0.5X_{L2} + X_{m2})}{(0.5X_{L2} + X_{m2} - X_c)} \right|, \text{此时 } A$$

呈现感性性质,因此N侧负序方向元件将故障判为反方向,进而向M侧发出闭锁信号(以闭锁式方向保护为例),因此负序方向保护能可靠不动作;

$$2) |0.5X_{L2}| < \left| \frac{X_c(0.5X_{L2} + X_{m2})}{(0.5X_{L2} + X_{m2} - X_c)} \right|, \text{此时 } A$$

呈现容性性质,N侧负序方向元件将故障判为正方向,加之此时M侧同样判为正方向,此时保护误动。

随着电压等级的升高,分布电容容抗值 X_c 不断下降,此时情形1)更容易满足;但随着电压等级的下降,容抗值 X_c 增大,则情形2)更容易满足。因此在输电网中,电压等级越低,分布电容对负序方向元件的影响就越大。为此需要寻求一种防止负序方向元件误动的措施。

2 基于正序电流幅值变化趋势的预防措施

以图 3 为例,当发生外部故障(k_1)时,线路两侧正序电流之和为流过分布电容的正序电流,即 $I_{m1} + I_{n1} = I_{c1}$ (下标 1 表示正序分量)。但是,由于外部故障造成线路全线电压下降,因此 I_{c1} 一般将变小。而发生内部故障(k)时,显然存在 $I_{m1} + I_{n1} = I_{c1} + I_{k1}$, I_{k1} 表示流过故障 k 点的正序电流,此时虽然 I_{c1} 降低,但由于短路电流的急剧增大,所以 $I_{m1} + I_{n1}$ 的幅值也增大。系统正常运行时, $I_{m1} + I_{n1}$ 幅值几乎不变,为电容电流。因此可以利用线路两侧保护安装处正序电流幅值之和的变化趋势来识别区内、外部故障:当 $I_{m1} + I_{n1}$ 下降时,即使两侧负序方向元件都判为正方向,保护也不能动作;反之,保护可靠动作。

图 4 给出了不同工况下保护安装处两侧正序电流幅值之和的变化趋势。由图 4 可以看出,保护安装处两侧正序电流幅值之和正常运行时不变,内部故障时呈现上升趋势,而外部故障时呈现下降趋势。因此可以利用此特征来进一步区分区内、外故障,确保负序方向保护不误动:当负序方向元件感受到的方向即使都为正方向时,如果两侧正序电流幅值之和呈现降低的趋势,要将负序方向元件退出运行。

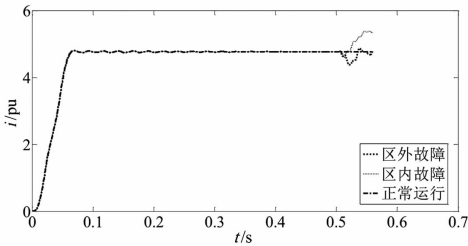


图 4 不同工况时正序电流幅值变化趋势

图 5 给出了在输电网下负序方向保护动作逻辑框图,其中 $P_2 +$ 表示保护安装处两侧感受到的负序方向都为正方向, $I_1 \uparrow$ 表示两侧正序电流之和呈现上升趋势。如果正序电流幅值呈现下降趋势,则不满足负序保护动作逻辑,保护能可靠不动作。



图 5 输电网负序方向元件动作逻辑

3 仿真验证

基于 PSCAD/EMTDC 搭建了图 1 所示的仿真模型,其中模型参数如表 1 所示。

3.1 外部故障时负序方向元件仿真结果

表 1 线路参数列表				单位:Ω
参数	数值	参数	数值	
正序电阻	0.007 58	零序电阻	0.154 210	
正序感抗	0.263 65	零序感抗	0.830 600	
正序容抗	0.013 97	零序容抗	0.009 296	

注:线路长度 200 km,电压等级 220 kV。

图 6 给出了图 1 中 k_1 点发生 AB 接地故障时保护安装处两侧负序方向元件的判别结果。通过图 6 可以看出,此时线路两侧电压与电流的相位关系满足内部故障的判别条件,保护会动作,造成保护误动。因此需要新的解决措施来防止保护的误动作。

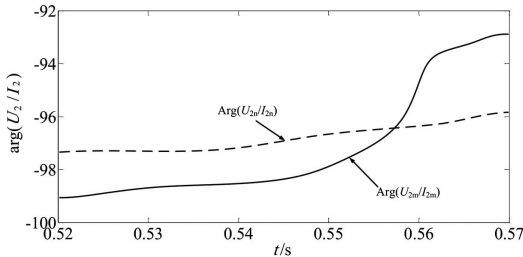


图 6 外部故障时仿真结果

3.2 预防措施的仿真验证

图 7 给出了在与图 6 相同故障形式时保护安装处两侧正序电流幅值之和的变化趋势。通过图 7 可以看出,此时正序电流幅值呈现下降趋势,如图中虚线框所示,随后才恢复正常。因此利用图 5 新的动作逻辑,可以确保负序方向保护不误动。

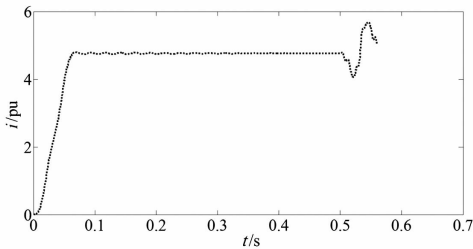


图 7 正序电流幅值变化曲线

4 结 论

详细分析了分布电容对负序方向保护的影响,

其主要结论如下:

- 1)在考虑分布电容影响的输电网中,随着电压等级的降低,分布电容对负序方向元件影响增大。
- 2)区外故障时,保护安装处两侧正序电流幅值之和呈现下降趋势,而区内故障时呈现上升趋势,正常运行时保持不变。

利用此特征构成输电网负序方向保护的逻辑,可以有效防止区外故障时保护误动的发生。

参考文献

[1] 黄少锋. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社, 2015.

[2] 申志成,张慧媛,龚仁敏,等. 基于全故障类型的负序方向元件改进方法[J]. 电测与仪表,2016,53(8):124-128.

[3] 李振动,赵青春,董杰,等. 串联补偿对差动保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2015, 43(10):139-143.

[4] 唐萃,尹项根,戚宣威,等. 大串补度输电线路的电流差动保护分析与对策[J]. 电力系统自动化,2015, 39

(上接第26页)

电磁暂态仿真建模验证了该对策的可行性。结果表明,所提出的方法能够有效地降低直流单极接地故障下直流融冰装置的运行风险,对于指导现场融冰、防范直流融冰装置单极接地故障下的运行风险具有较好的实用性。

参考文献

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

[2] 许树楷,杨煜,傅闯. 南方电网直流融冰方案仿真研究[J]. 南方电网技术,2008,2(2):31-36.

[3] 张庆武,田杰,傅闯,等. 特高压直流控制系统融冰工作方式研究[J]. 高电压技术,2008, 34(11): 2276-2282.

[4] 苑吉河,蒋兴良,易辉,等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高电压技术,2003,29(1):6-10.

[5] 傅闯,饶宏,黎小林,等. 直流融冰装置的研制与应用[J]. 电力系统自动化,2009,33(11):53-56.

[6] Horwill C, Davidson C C, Granger M. An Application of

(7):157-163.

[5] 关永刚,郭佩琪,项祖涛,等. 特高压串补线路短路电流的延时过零特性[J]. 中国电机工程学报,2015,35(11):2879-2886.

[6] 张尧. 1 000 kV 特高压输电线路分布电容对继电保护影响的研究[D]. 南宁:广西大学,2014.

[7] 薛士敏,贺家李,李永丽. 特高压输电线路分布电容对负序方向纵联保护的影响[J]. 电网技术,2008, 32(17):94-97.

[8] 汤枫,袁越,王宾,等. 特高压交流输电线路负序方向保护动作特性仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2007(s1):36-41.

作者简介:

王云昊(1986),硕士研究生、工程师,主要从事电网调控运行工作;

刘宪翔(1982),硕士研究生、高级工程师,主要从事电网调控运行工作;

吴杰(1981),硕士研究生、工程师,主要从事电网调控运行工作。

(收稿日期:2017-09-10)

HVDC to the De-icing of Transmission Lines[C]. Proceedings of the 2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, TX, USA2006: 529-534.

[7] 孙才新,蒋兴良,熊启新,等. 导线覆冰及其干湿增长临界条件分析[J]. 中国电机工程学报,2006,23(3): 141-145.

[8] Dery A, Gingras J, Hydro P. Québec De-icing Projects [C]. The 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Montreal, Canada, June 2005.

[9] Horwill C, Davidson C, Granger M, et al. An Application of HVDC to the De-icing of Transmission Lines [C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES Dallas, USA.

[10] Granger M, Dutil A, Nantel A. Performance Aspects of Levis Substation De-icing Project Using DC Technology [C]. The 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Montreal, Canada, June 2005.

作者简介:

李训(1975),工程师,目前主要从事电能质量、水电站及防汛管理工作。

(收稿日期:2017-11-20)

抑制风电爬坡事件的双蓄电池组参数优化配置

戴长春¹, 章怡帆²

(1. 国网安徽省电力公司调度通信中心, 安徽 合肥 230061;
2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要:为了抑制风电爬坡事件,降低风电并网功率波动越限概率,提出了基于风电爬坡事件和双蓄电池组储能系统 (battery energy storage system, BESS) 的同步和异步控制策略,合理配置蓄电池组充放电时间,优化 BESS 参数。分析了风电爬坡事件,考虑弃风,基于改进粒子群算法(improved particle swarm optimization, IPSO)优化蓄电池组的使用寿命和装置费用,以及弃风与缺额的惩罚费用。仿真结果表明,动态风电爬坡事件定义更精确,异步控制策略更加有效,合理规划弃风的经济更优。

关键词:双蓄电池组; 爬坡事件; 配置方法; 改进粒子群算法

中图分类号:TM614 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2018)01 - 0031 - 05

Optimization Configuration of Dual BESS for Suppressing Wind Power Ramp Event

Dai Changchun¹, Zhang Yifan²

(1. Anhui Electrical Power Dispatching and Communication Center, Hefei 230061, Anhui, China;
2 Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract:In order to avoid the wind power ramp event and reduce the probability of wind power fluctuation, the synchronous and asynchronous control strategies are proposed based on wind power ramp event and dual battery energy storage system (BESS) to allocate the battery charge and discharge time rationally and optimize BESS parameters. The wind power ramp event is analyzed by considering the wind curtailment, and the life time and installation cost of the battery are optimized as well as the penalty cost of wind curtailment and deficiency based on the improved particle swarm optimization algorithm (IPSO). The simulation results show the accuracy of dynamic definition to the wind power ramp event, the effectiveness of the asynchronous control strategy, and the economics of reasonable planning of wind curtailment.

Key words:dual battery packs; ramp event; configuration; improved particle swarm optimization

0 引 言

大规模风电并网引起电网功率波动^[1-2],为了有效平抑波动,在并网系统中加入储能装置以减少弃风及弥补缺额。

风电功率持续波动,单一蓄电池组储能系统 (battery energy storage system, BESS)^[3-4]存在充放电频率过高和满充满放的问题。这里采用双 BESS^[5]配置,两组蓄电池采用同步或异步控制策略进行交替充放电,改善了平抑效果。采用同步控

制^[6]时,两组蓄电池始终分别处于充、放电状态,可以及时响应波动极端的情况,但 BESS 的容量无法充分利用,造成成本增加;采用异步控制时,蓄电池可同时处于充电或放电状态来充分利用 BESS 的容量,但蓄电池组都处于充电状态时无法响应风电缺额。

风电爬坡事件是一种短时间尺度下的大幅波动,往往发生在切入风速至额定风速段和切出风速段,对蓄电池充放电过程有很大的冲击。风-储系统弃风对电网无冲击,而缺额只能依靠电网中其他发电设备弥补。合理规划弃风和缺额,充分利用风能资源实现经济最大化。

文献[7]研究了风电爬坡率与储能结合的优化控制,采用最佳荷电状态的方式进行优化,但未考虑精确的风电爬坡模型。文献[8-9]分别提出风-储系统的联合调度模型和基于正态分布的容量估算法,但未考虑储能系统的经济效益。

上述文献中,未结合风电爬坡事件、BESS 控制策略和弃风经济性研究。下面综合考虑 BESS 运行条件,蓄电池采用同步与异步控制策略,以蓄电池的装置费用和使用寿命以及弃风缺额惩罚费用为目标函数,以风电场和 BESS 安全运行为约束条件,同时以功率波动越限概率和幅值为评价指标,采用 IPSO 算法优化配置 BESS 的额定容量及功率,降低风电场功率波动对电网的冲击,降低系统成本。算例对比不同爬坡事件定义的适用性、同步与异步控制策略的优劣性,分析弃风因素的经济性。

1 风-储并网系统模型

风电场侧装设两组蓄电池,风-储并网系统结构如图1,并网的输出功率满足:

$$P_{\text{sys}}(t) = P_{\text{wt}}(t) - \Delta P_{\text{loss}}(t) + P_{\text{B}}(t) \quad (1)$$

式中: $P_{\text{sys}}(t)$ 为 t 时刻并网点的输出功率; $P_{\text{wt}}(t)$ 为 t 时刻风电场的输出功率; $\Delta P_{\text{loss}}(t)$ 为 t 时刻风电系统的损耗功率; $P_{\text{B}}(t)$ 为 t 时刻 BESS 的总输出功率, $P_{\text{B}}(t) \geq 0$ 时,蓄电池放电;当 $P_{\text{B}}(t) < 0$ 时,蓄电池充电。 $P_{\text{B1}}(t)$ 、 $P_{\text{B2}}(t)$ 为 BESS1、BESS2 t 时刻的输出功率。

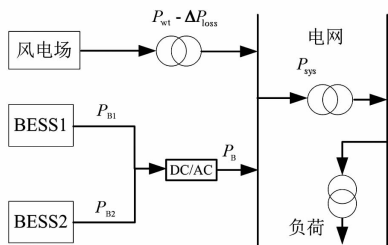


图1 风-储并网系统结构

BESS 的平抑效果不要求输出为一条平稳的直线,只要满足国家风电并网标准^[10-11]要求即可。

$$\Delta P_{\text{S}}(t) = |P_{\text{sys}}(t) - P_{\text{sys}}(t - \Delta t)| \leq P_{\text{val}} \quad (2)$$

式中: $\Delta P_{\text{S}}(t)$ 为 t 时刻与相邻 $(t - \Delta t)$ 时刻的功率差; Δt 为采样时间间隔; P_{val} 为并网功率波动限幅。

2 风电爬坡事件

当输出功率波动幅值大于波动限幅 P_{val} 时,认

为发生爬坡事件,定义爬坡幅值:

1) t 时刻和 $(t - \Delta t)$ 时刻

$$\Delta P_{\text{wt}}(t) = P_{\text{wt}}(t) - P_{\text{wt}}(t - \Delta t) \quad (3)$$

2) 时间段 $(t - \Delta t, t)$ 内

$$\Delta P_{\text{wt}}(t) = \max[P_{\text{wt}}(i)] - \min[P_{\text{wt}}(i)] \quad (4)$$

3) 引入 t 时刻的并网功率^[12]

$$\Delta P_{\text{wt}}(t) = \begin{cases} |\Delta P_{\text{max}+}(t)|, |\Delta P_{\text{max}+}(t)| \geq |\Delta P_{\text{max}-}(t)| \\ |\Delta P_{\text{max}-}(t)|, |\Delta P_{\text{max}+}(t)| < |\Delta P_{\text{max}-}(t)| \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i \in (t - \Delta t, t)$; $\Delta P_{\text{wt}}(t)$ 为爬坡幅值; $\Delta P_{\text{max}+}(t)$ 为 t 时刻与时间段 $(t - \Delta t, t)$ 内的最小值之差; $\Delta P_{\text{max}-}(t)$ 为 t 时刻与时间段 $(t - \Delta t, t)$ 内的最大值之差。

式(3)、式(4)多用于静态优化控制计算,而式(5)为动态定义,可有效避免遗漏越限情况。所研究的 BESS 运行情况,爬坡事件数值特征越接近实际越理想。

3 双蓄电池组控制策略

t 时刻风-储系统的输出功率波动幅值为

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{S}}(t) &= \eta_{\text{wt}} \Delta P_{\text{wt}}(t) - P_{\text{B}}(t - \Delta t) + P_{\text{B}}(t) \\ &= \Delta P(t) + P_{\text{B}}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: η_{wt} 为风电系统效率(含损耗 ΔP_{loss}); $\Delta P(t)$ 为过渡变量。

BESS 需要平抑的功率为 $\Delta P_{\text{B}}(t)$ 。

$$\Delta P_{\text{B}}(t) = \begin{cases} -\Delta P(t) + P_{\text{val}}, \Delta P(t) \geq \lambda P_{\text{val}} \\ -\Delta P(t) - P_{\text{val}}, \Delta P(t) < -\lambda P_{\text{val}} \end{cases} \quad (7)$$

式中, λ 为安全裕度,保障电网安全。

蓄电池组储能过程满足:

$$\begin{cases} E_{\text{B}}(t) = E_{\text{B}}(t - \Delta t) - \frac{P_{\text{B}}(t) \Delta t}{\eta_{\text{dis}}}, P_{\text{B}}(t) \geq 0 \\ E_{\text{B}}(t) = E_{\text{B}}(t - \Delta t) - P_{\text{B}}(t) \Delta t \eta_{\text{ch}}, P_{\text{B}}(t) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $E_{\text{B}}(t)$ 为 t 时刻蓄电池组的剩余容量; η_{ch} 、 η_{dis} 为蓄电池组充、放电效率。

为了得到更好的平抑效果,对比同步与异步控制策略。

3.1 两组蓄电池处于不同状态

蓄电池组的最大充、放电功率为

$$\begin{cases} P_{\text{ch}}(t) = -\min\left\{P_{\text{Bmax}}, \frac{(S_{\text{OCmax}} - S_{\text{OC}}(t - \Delta t))}{\eta_{\text{ch}} \Delta t} E_{\text{BESS}}\right\} \\ P_{\text{dis}}(t) = \min\left\{P_{\text{Bmax}}, \frac{(S_{\text{OC}}(t - \Delta t) - S_{\text{OCmin}})}{\Delta t} E_{\text{BESS}} \eta_{\text{dis}}\right\} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{ch}}(t)$ 为蓄电池最大可充电功率; $P_{\text{dis}}(t)$ 为蓄电池最大可放电功率; P_{Bmax} 为蓄电池额定功率(最大充电爬坡率); S_{OCmax} 为蓄电池最大荷电量; $S_{\text{OC}}(t)$ 为蓄电池 t 时刻荷电状态; E_{BESS} 为蓄电池额定容量。

假设 BESS1 为充电状态, BESS2 为放电状态。

1) 充电时, BESS2 的状态不变, $P_{\text{B2}}(t) = 0$; BESS1 充电功率 $P_{\text{B1ch}}(t)$ 为

$$P_{\text{B1ch}}(t) = -\min\{|\Delta P_{\text{B}}(t)|, |P_{\text{ch}}(t)|\} \quad (10)$$

2) 放电时, BESS1 的状态不变, $P_{\text{B1}}(t) = 0$; BESS2 的放电功率 $P_{\text{B2dis}}(t)$ 为

$$P_{\text{B2dis}}(t) = \min\{|\Delta P_{\text{B}}(t)|, |P_{\text{dis}}(t)|\} \quad (11)$$

同步控制时, BESS1 或 BESS2 任意一组达到满充或满放状态, 下一刻 BESS1 和 BESS2 的状态都改变。

异步控制时, 任意一组 BESS 达到满充或满放状态, 下一时刻该组 BESS 改变状态, 另一组保持不变。

3.2 两组蓄电池处于同一状态

只在异步控制时发生。

1) 都处于充电状态: 若 $|\Delta P_{\text{B}}(t)|$ 可以被 $S_{\text{OC}}(t - \Delta t)$ 更接近 S_{OCmax} 的蓄电池(假设为 BESS1)全部吸收时, 则根据式(10)计算; 否则 $|\Delta P_{\text{B}}(t)|$ 过大, 两个蓄电池组同时工作, BESS1 充电功率为 $P_{\text{B1}}(t)$, BESS2 的充电功率为

$$P_{\text{B2}}(t) = \begin{cases} 0, & |\Delta P_{\text{B}}(t)| \leq |P_{\text{B1}}(t)| \\ \Delta P_{\text{B}}(t) - P_{\text{B1}}(t), & |\Delta P_{\text{B}}(t)| \leq |P_{\text{B}}(t)| \\ P_{\text{B2}}(t), & |\Delta P_{\text{B}}(t)| > |P_{\text{B}}(t)| \end{cases} \quad (12)$$

$$P_{\text{B}}(t) = P_{\text{B1}}(t) + P_{\text{B2}}(t) \quad (13)$$

2) 都处于放电状态: 若 $|\Delta P_{\text{B}}(t)|$ 可以被 $S_{\text{OC}}(t - \Delta t)$ 更接近 S_{OCmin} 的蓄电池(假设为 BESS2)全部补足时, 则根据式(11)计算; 否则 $|\Delta P_{\text{B}}(t)|$ 过大, 两个蓄电池组同时工作, BESS2 放电功率为 $P_{\text{B2}}(t)$, BESS1 的放电功率为

$$P_{\text{B1}}(t) = \begin{cases} 0, & |\Delta P_{\text{B}}(t)| \leq |P_{\text{B2}}(t)| \\ \Delta P_{\text{B}}(t) - P_{\text{B2}}(t), & |\Delta P_{\text{B}}(t)| \leq |P_{\text{B}}(t)| \\ P_{\text{B1}}(t), & |\Delta P_{\text{B}}(t)| > |P_{\text{B}}(t)| \end{cases} \quad (14)$$

3.3 弃风与缺额

弃风发生在蓄电池充电状态 $P_{\text{B}}(t) < 0$:

$$P_{\text{cur}}(t) = \begin{cases} 0, & |\Delta P_{\text{B}}(t)| \leq |P_{\text{B}}(t)| \\ -\Delta P_{\text{B}}(t) + P_{\text{B}}(t), & |\Delta P_{\text{B}}(t)| > |P_{\text{B}}(t)| \end{cases} \quad (15)$$

缺额发生在蓄电池放电状态 $P_{\text{B}}(t) > 0$:

$$P_{\text{lack}}(t) = \begin{cases} 0, & |\Delta P_{\text{B}}(t)| \leq |P_{\text{B}}(t)| \\ \Delta P_{\text{B}}(t) - P_{\text{B}}(t), & |\Delta P_{\text{B}}(t)| > |P_{\text{B}}(t)| \end{cases} \quad (16)$$

系统并网功率重新定义为

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{S}}(t) &= \eta_{\text{wt}} \Delta P_{\text{wt}}(t) + \Delta P_{\text{B}}(t) - \Delta P_{\text{cur}}(t) \\ &= \Delta P(t) + P_{\text{B}}(t) - P_{\text{cur}}(t) \end{aligned} \quad (17)$$

式中, $\Delta P_{\text{wt}}(t)$ 、 $\Delta P_{\text{B}}(t)$ 、 $\Delta P_{\text{cur}}(t)$ 分别为 t 时刻与 $(t - \Delta t)$ 时刻的风电、蓄电池和弃风功率差。

4 优化模型

4.1 目标函数

1) 储能系统装置费用 F_{equip}

$$F_{\text{equip}} = w_{\text{E}} E_{\text{BESS}} + w_{\text{p}} P_{\text{Bmax}} \quad (18)$$

式中: w_{E} 为 BESS 的单位容量费用; w_{p} 为 BESS 的单位功率费用。

2) 蓄电池寿命费用 F_{count}

蓄电池的充放电次数有限, 完整交替充放电记一次充放电次数^[13]。

$$F_{\text{count}} = \frac{n_{\text{ch}} + n_{\text{dis}}}{n_{\text{total}}} M_{\text{inv}} \quad (19)$$

式中: n_{ch} 、 n_{dis} 分别为充、放电次数; n_{total} 为寿命周期; M_{inv} 为蓄电池投资成本。

3) 弃风缺额惩罚费用 F_{punish}

$$F_{\text{punish}} = w_{\text{cur}} \sum_t P_{\text{cur}}(t) + w_{\text{lack}} \sum_t P_{\text{lack}}(t) \quad (20)$$

式中, w_{cur} 、 w_{lack} 分别为单位弃风和缺额费用。

4) 总使用支出费用 F_{cost}

$$F_{\text{cost}} = w_1 \left(\frac{n_{\text{ch}} + n_{\text{dis}}}{n_{\text{total}}} F_{\text{equip}} + F_{\text{count}} \right) + w_2 F_{\text{punish}} \quad (21)$$

式中, w_1 、 w_2 为各目标函数所占的比例。

4.2 约束条件

蓄电池的充放电功率需满足:

$$-P_{\text{Bmax}} \leq P_{\text{B}}(t) \leq P_{\text{Bmax}} \quad (22)$$

为了避免过充过放, 蓄电池组受到其荷电状态的限制。

$$S_{OC}(t) = E_B(t)/E_{BESS}$$

(23)

$$S_{OCmin} \leq S_{OC}(t) \leq S_{OCmax}$$

(24)

4.3 评价指标

功率波动越限概率和幅值越小,平抑波动的效果越好,控制策略越有效。

1) 波动越限次数 U

$$U = \sum_{t=1}^{T/\Delta t} S(|\Delta P_S(t)| - P_{val})$$

(25)

$$\begin{cases} S = 1, & |\Delta P_S(t)| - P_{val} > 0 \\ S = 0, & |\Delta P_S(t)| - P_{val} \leq 0 \end{cases}$$

(26)

式中, S 为二进制数,取 0 或 1。

2) 波动越限概率 ΔU

$$\Delta U = \frac{U}{T/\Delta t} \times 100\%$$

(27)

式中, T 为总时间。

3) 波动越限幅值之和 ΔW

$$\Delta W = \sum_{t=0}^{T/\Delta t} ||\Delta P_S(t)| - P_{val}|$$

(28)

4.4 改进粒子群优化算法 (IPSO)

为避免 PSO 陷入局部最优,引入惯性权重 w_k , 较大的 w_k 有利于提高收敛速度,较小的 w_k 有利于提高收敛精度^[14]。

$$w_k = w_{max} - Dt \times \frac{w_{max} - w_{min}}{Dt_{max}}$$

(29)

式中: Dt 为当前粒子的迭代次数; Dt_{max} 为算法开始设置的最大迭代次数; w_{max} 、 w_{min} 为设置的最大和最小惯性权重。

随着迭代次数增加,希望粒子的搜索能力由局部寻优转为全局寻优,因此,加速常数 c_1 逐渐减小, c_2 逐渐增大^[15]。

$$c_1 = c_{1max} - \frac{Dt}{Dt_{max}} \times 1.0$$

(30)

$$c_2 = c_{2min} - \frac{Dt}{Dt_{max}} \times 1.0$$

式中, c_{1max} 、 c_{2min} 分别为最大和最小加速常数。

因此,粒子群速度和位置公式为

$$v_{Dt+1} = w_k v_{Dt} + c_1 r_1 (p_{best} - p_{Dt}) + c_2 r_2 (g_{best} - p_{Dt})$$

(31)

$$p_{Dt+1} = p_{Dt} + v_{Dt+1}$$

(32)

式中: r_1 、 r_2 为随机数; p_{best} 为单个粒子最优位置; g_{best} 为全局粒子最优位置; p_{Dt} 为粒子第 Dt 次迭代时的位置。

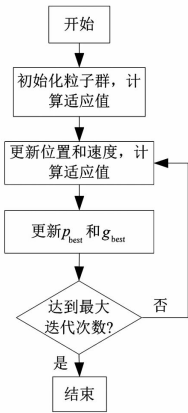


图 2 IPSO 算法流程

5 算例分析

算例中的风电场额定功率为 50 MW,选取该风电场某典型日的风电功率实测数据,采样周期为 1 min。风电功率 10 min 内输出的波动不超过额定功率的 10%,安全裕度取 0.9。表 1 给出 BESS 的装置参数和经济系数。

表 1 BESS 装置参数和经济系数

参数	数值	参数	数值
$\eta_{ch}/\%$	90	$w_E/(元 \cdot KW^{-1} \cdot h)$	200
$\eta_{dis}/\%$	85	$w_P/(元 \cdot KW^{-1})$	150
$S_{OCmax}/\%$	80	$M_{inv}/元$	5×10^5
$S_{OCmin}/\%$	20	$w_{cur}/(元 \cdot KW^{-1})$	0.5
$n_{total}/次$	2×10^4	$w_{lack}/(元 \cdot KW^{-1})$	1.8

5.1 爬坡事件定义对比

分析不同定义下的风电爬坡事件。

表 2 风电爬坡事件数据特征

定义	$\Delta t = 1\ min$	$\Delta t = 10\ min$		
		定义(1)	静态	动态
平均值	3.254 4	5.679 8	4.811 3	4.193 5
标准差	1.406 1	3.380 1	2.880 5	2.477 1

由表 2 可以看出,对比短时间的波动情况,可知动态定义下的数据平均值和标准差更能反映风功率的变化。

由图 3 可以看出,动态定义能采集到更完整的波动情况,因此选择动态定义进行研究更为合理。

蓄电池的充放电功率不仅受自身额定容量和功率的约束,而且受到并网条件的约束。因此,配置合适的蓄电池参数时需综合考虑。

5.2 对比异步、同步控制策略

选取两组额定容量均为 10 MWh、额定功率均为 5 MW 的蓄电池,对比同步和异步控制策略的优

劣性,见表 3、表 4。

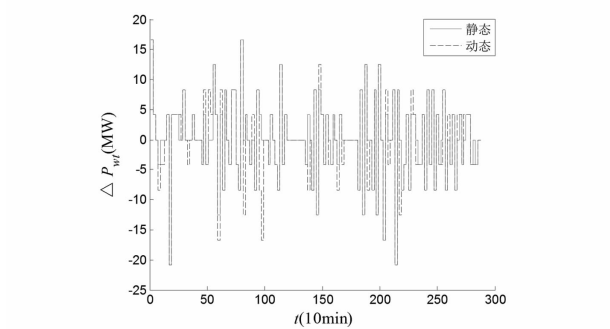


图 3 不同风电爬坡事件对比

表 3 BESS 平抑前的指标

$U/\text{次}$	$\Delta U/\%$	$\Delta W/\text{MW}$
40	5.33	208.33

表 4 异步与同步配置对比

参 数	异 步		同 步	
	不弃风	弃风	不弃风	弃风
$(n_{\text{ch}} + n_{\text{dis}})/\text{次}$	16	17	18	18
$U/\text{次}$	21	10	24	12
$\Delta U/\%$	2.80	1.33	3.20	1.60
$\Delta W/\text{MW}$	82.20	54.37	83.74	54.98
P_{cur}/MW	(24.17)	30.23	(23.99)	35.99
$P_{\text{lack}}/\text{MW}$	(68.53)	59.63	(72.24)	61.65

由表 3、表 4 可以看出,加入 BESS 后,波动越限概率和越限幅值大幅下降。舍弃多余的风电功率,明显地改善了平抑效果。对比两种控制策略下的指标可知,异步控制策略的波动越限概率及幅值都优于同步控制策略的。由分析可知,不同的额定容量和功率的 BESS,容量和功率越大,输出波动越小,平抑效果越好,但会增加额外的系统装置费用。弃风和缺额总量与系统的额定功率及容量有关,综合考虑装置费用等因素,进行优化计算。

5.3 IPSO 优化

IPSO 中的各项参数: $w_{\text{max}} = 0.9, w_{\text{min}} = 0.4, c_{1\text{max}} = 1.1, c_{2\text{min}} = 0.8$ 。配置优化对比见表 5,效果对比如图 4 所示。

表 5 异步与同步配置优化对比

参数	异步	同步
$2E_{\text{BESS}}/\text{MWh}$	18.4	19.5
$P_{\text{Bmax}}/\text{MW}$	6.1	6.0
$(n_{\text{ch}} + n_{\text{dis}})/\text{次}$	15	14
$U/\text{次}$	11	12
$\Delta U/\%$	1.4	1.6
$\Delta W/\text{MW}$	56.13	63.76
P_{cur}/MW	40.64	53.48
$P_{\text{lack}}/\text{MW}$	61.63	69.76
$F_{\text{ost}}/(10^3 \text{ 元})$	3 003.6	3 399.5

由表 5 可以看出,异步控制策略的 BESS 额定容量及额定功率要求相差不多,且其平抑效果更好,因此计及越限及弃风缺额惩罚费用,其总体费用比同步控制的小。

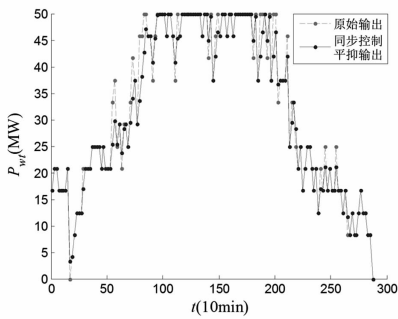
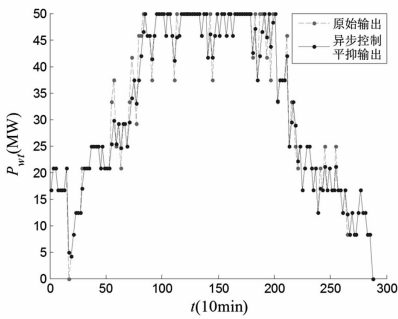


图 4 同步与异步控制的平抑效果对比

由图 4 可以看出,在波动幅度较大时,异步控制更能充分利用蓄电池容量,最大限度利用风能,在不越限的情况下达到经济最优化。

6 结 语

前面提出了一种基于抑制风电爬坡事件的优化配置双蓄电池储能并网系统参数的方法。首先分析了风电爬坡事件的不同定义的适用性,动态定义的风电爬坡事件更能体现实测数据的特征。详细介绍了同步和异步控制策略,分析了两种控制策略的优劣性,可知异步控制策略能有效地利用蓄电池容量,且平抑波动的效果更好,经济性高。最后利用改进粒子群算法优化配置蓄电池组的参数。

参考文献

[1] 汪海蛟,江全元. 应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (19): 126 – 135.

[2] 黎静华,左俊军,汪赛. 大规模风电并网电力系统运行风险评估与分析[J]. 电网技术, 2016, 40 (11): 3503 – 3510.

(下转第 43 页)

载波移相 SPWM 在贯通式同相供电系统中的应用

郭晓宇

(乌鲁木齐铁路局供电处,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:针对贯通式同相供电系统中的交-直-交变流器输出电流(电压)谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)较高的问题,提出采用载波移相正弦波脉宽调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)方法,将多个单相逆变器级联输出,以此改善输出电压波形。在 Matlab/Simulink 中建立系统模型进行仿真测试,结果表明,所提方法能够有效改善牵引供电系统电能质量问题,使牵引侧负载电压 THD 含量减少、电力电子器件耐压水平降低。

关键词:贯通式同相供电系统;交-直-交变流器;载波移相 SPWM;谐波畸变率

中图分类号:TM712 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)01-0036-03

Application of Carrier Phase Shifted – SPWM to Continuous Co – phase Power Supply System

Guo Xiaoyu

(Power Supply Department of Urumqi Railway Administration, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract:In order to solve the problem that the harmonic content in output current (voltage) of AC – DC – AC converter is higher, carried phase shifted – sinusoidal pulse width modulation (CPS – SPWM) method is proposed to improve the output voltage waveform by taking cascade multiple single – phase inverter as output device. Then, the simulation model is established in Matlab/Simulink. The simulation results show that the proposed CPS – SPWM can improve the power quality of traction power supply system efficiently, reduce the THD content of load voltage, and lower the peak voltage of power electronic devices.

Key words:continuous co – phase power supply system; AC – DC – AC converter; carried phase shifted – sinusoidal pulse width modulation (CPS – SPWM); total harmonic distortion (THD)

0 引言

牵引供电系统中因为电气化铁路的单相负载将产生特别差的电能质量,如无功电流、谐波、不平衡有功电流。由于牵引变电所的大功率性质,不良影响将扩大到电网。当基于脉宽调制(pulse – width modulation, PWM)变换器的机车被广泛使用时,由无功功率和谐波引起的失真减少,但不平衡变得比以前更显著^[1]。传统的牵引供电系统,为了平衡两相负载,一个牵引变电所使用两相供电臂的方案被广泛采用。如果采用平衡变压器,次边的两相电流平衡会造成原边的三相电流平衡。现有的几个平衡变压器的接线方案,如变形伍德布里奇、斯科特和屋

顶三角形变压器^[2],作为馈电变压器都有自己的特性和性能。但是如果两相的电流是不平衡的,平衡变压器就不能完全平衡三相电流。不幸的是,因为在两相供电系统中机车的速度和负载条件经常变化,两相牵引供电系统中的馈线电流通常是不平衡的。此外,平衡变压器对无功功率和谐波是没有用的。

为了解决这些问题,在三相电网或两相牵引网络中采用了一些有源补偿器。相对于无源补偿技术来说,三相电网中使用的有源补偿器,包括晶闸管控制电抗器、静止同步补偿器以及有源电力滤波器,它们有多个补偿公用设施和良好的瞬态性能^[3]。但它们不完全符合牵引供电系统的要求。

此外,传统电气化铁路牵引变电所采用的供电

方式是三相 - 两相制,在分区所处设置分相绝缘器。但实际中因为牵引负荷的单相性和随机性,系统中会产生大量的无功和谐波分量,此类电能质量问题加之电分相环节的存在,将会严重制约高速、重载铁路的发展^[4-6]。

目前已开展的有关同相供电技术的研究能很好地解决这一问题。文献[7-10]提出的同相供电系统方案,可以在同一电网供电区间内取消电分相环节;但在不同电网的供电区段仍旧需要采用分相环节来隔离,因此存在供电缺陷。贯通式同相供电系统通过采用交 - 直 - 交变流器,实现全线范围内的贯通供电,以达到彻底取消电分相环节和改善电能质量的目的。文献[11-12]提出了一种基于双 PWM 整流器的交 - 直 - 交变流器的设计方案,但该方法存在输出波形畸变率大、电力电子器件承受电压高的缺点。

载波移相 SPWM 技术能够在器件开关频率较低的情况下,实现较高的等效开关频率,因此广泛应用于大功率变流器场合^[13-15]。这里提出采用载波移相技术,将单相逆变器级联后输出,以期改善输出电压波形,降低绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)承受电压。

1 贯通式同相供电系统结构

贯通式同相供电系统是针对同相供电系统中存在的供电缺陷提出的,能够在全线范围内的不同牵引变电所的供电区段上实现接触网电压相位相同,是线路上没有电分相环节的牵引供电系统^[16]。贯通式同相供电系统主要由三相降压变压器、交 - 直 - 交变流器和单相升压变压器组成,其结构如图 1 所示。

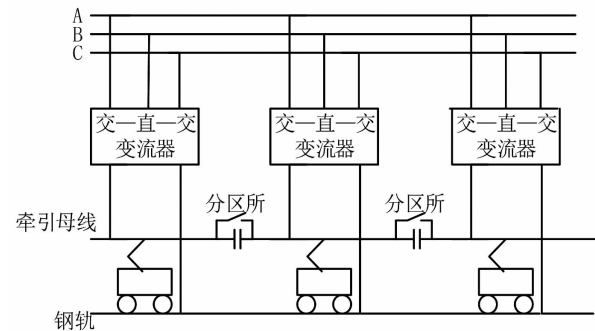


图 1 贯通式同相供电系统结构图

在这种结构下,牵引网取流需要经过三相交流 - 直流 - 单相交流的全变换过程,使得每个牵引变电所均逆变出幅值和频率相同的单相电压,将全线上的所有牵引变电所互联,形成一个独立于上一级电网的牵引供电网络,仅与三相电力系统交换有功功率,可以有效改善电能质量。

2 交 - 直 - 交变流器结构及原理

传统的交 - 直 - 交变流器由 1 个三相整流器和 1 个单相逆变器组成,不能实现大功率转换,且每个 IGBT 元件承受的峰值电压高。为了取得更好的输出波形,降低对电力电子开关器件耐压等级的要求,文献[17]提出依靠载波移相 SPWM 技术,将 4 个单相 PWM 逆变器级联输出电压作为交 - 直 - 交换流器中送入单相升压变压器的输入电压,交 - 直 - 交变流器结构如图 2 所示。

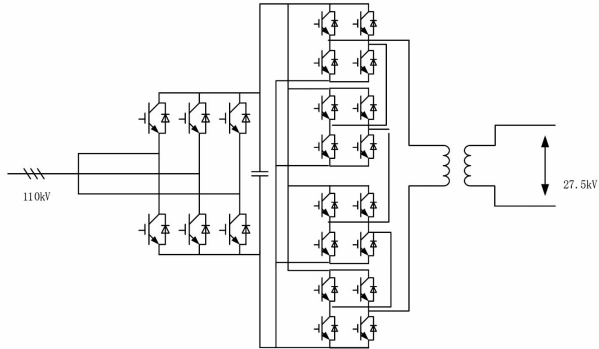


图 2 交 - 直 - 交变流器结构

3 交 - 直 - 交变流器控制策略

交 - 直 - 交变流器是贯通式同相供电系统中的核心器件,主要由三相整流环节、直流储能环节和单相逆变环节组成。三相降压变压器将 110 kV 电压降压后输入给三相 PWM 整流器,三相整流环节将三相交流电变换为直流电,并控制三相交流侧的功率因数为 1,两 PWM 整流器通过直流环节的电容传递有功功率,然后由单相 PWM 逆变器将直流电逆变为幅值和频率稳定的单相交流电后,输入给单相升压变压器将电压升至 27.5 kV 后输送给负载。

3.1 三相整流环节控制策略

三相电压型 PWM 整流器有很多控制方法,包括:直接功率控制、电流闭环控制、基于 LCL 滤波的

控制等。这里采用的是电压外环、电流内环的双闭环控制方案,分别按照 I 型系统和 II 型系统特点来设计电流内环和电压外环的比例积分(proportion integration, PI) 控制器,用电压外环来控制直流电压输出的稳定性,用电流内环来控制交流侧电流,提高网侧功率因数^[18]。三相整流器控制原理如图 3 所示。

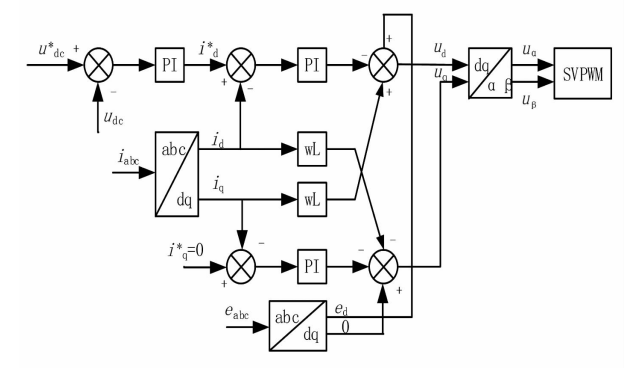


图 3 三相整流环节控制框图

3.2 单相逆变环节控制策略

采用载波移相 SPWM 技术,将单相 PWM 逆变器的输出通过串联叠加,将 4 组逆变器的三角载波分别错开一定相角^[19],则同样的调制波与三角载波比较后会产生 4 种错开一定角度的 PWM 波,分别用来控制每个逆变器,输出侧电压经过串联叠加后即可得到正弦阶梯波。每个 PWM 逆变器采用了电感电流内环加上输出电压外环的控制方案,单个逆变器的控制策略如图 4 所示。

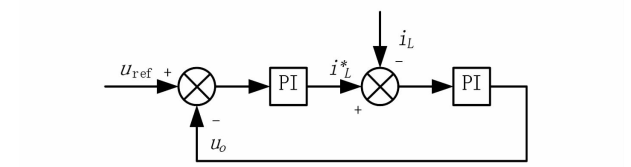


图 4 单个单相逆变器控制框图

4 仿真验证

在 Matlab/Simulink 中搭建了交-直-交变流器仿真模型,仿真参数如下:设定一套交-直-交变流器的额定容量为 4 MVA,三相降压变压器变比为 110 kV/2 kV,单相升压变压器变比为 8 kV/27.5 kV,直流储能电容为 2 mF。仿真开始时,负载为 4 800 kW 纯阻性负载,在 0.1 s 的时候突变为 2 400 kW,仿真运行结果如图 5、图 6 所示。

仿真结果表明,不管在负载突变前还是在负载

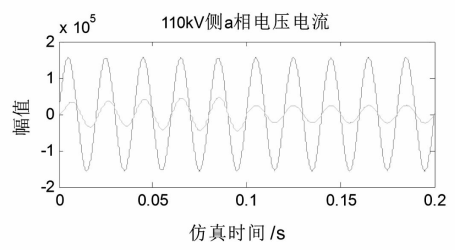


图 5 电力系统侧 A 相电压、电流

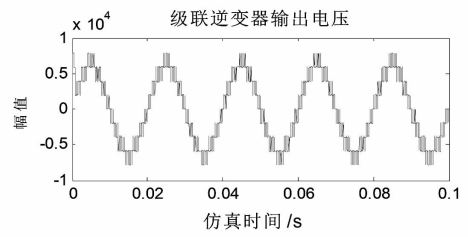


图 6 级联逆变器输出电压

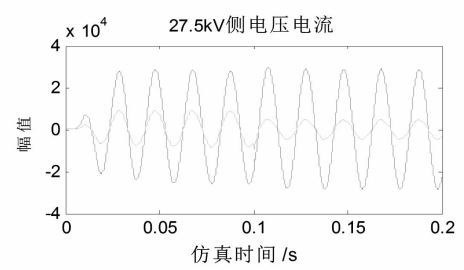


图 7 牵引侧电压电流

突变后,电网侧功率因数都能够在交-直-交流器的控制下基本达到 1(以 A 相电流为例)。利用 Matlab/Simulink 中的 FFT 工具对三相交流侧电流谐波含量进行分析,得到 A 相电流的 THD 含量为 1.74%,表明采用交-直-交流器的贯通式同相供电系统能够有效改善牵引供电系统的电能质量。

在负载突变后,负载电压能够保持电压幅值和频率的稳定性,并迅速从干扰中恢复到正常的工作状态,表明系统具有良好的抗干扰性能。

对比非载波移相 SPWM 交-直-交流器可知,在采用载波移相 SPWM 后,牵引侧负载电压的 THD 含量由以前的 1.5% 减少为 0.78%,并且在交-直-交流器容量相同的情况下,IGBT 承受的峰值电压减少为原来的 1/4。

5 结语

贯通式同相供电系统能够有效解决在传统牵引供电系统中存在的电能质量和电分相问题。在贯通

(下转第 48 页)

一起 110 kV 变压器绕组变形故障分析判断及解体验证

吴 波¹,丁登伟²,唐 铭¹,王 静¹,张军强¹,唐琳凯¹
(1. 国网四川省电力公司绵阳供电公司,四川 绵阳 621000;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘 要:介绍了一起 110 kV 三绕组变压器停电后例行检查过程中发现缺陷的过程情况,为变压器的精确诊断提供了典型案例。通过试验过程中的电气试验和油化试验数据以及带电振动测试数据对变压器进行了综合分析,最终得出变压器中压侧(35 kV 侧)遭受电流冲击导致绕组变形的结论,并解体得到了验证。通过对该变压器的精确诊断,有效地避免了一次变压器潜伏性事故的发生,并给出了变压器日常例行检查及带电检测工作中的注意事项和检修建议。
关键词:变压器;绕组变形;频率响应;短路阻抗;振动测试
中图分类号:TM403.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)01-0039-05

Analysis of One 110 kV Transformer Winding Deformation Fault and Disassembly Validation

Wu Bo¹, Ding Dengwei², Tang Ming¹, Wang Jing¹, Zhang Junqiang¹, Tang Linkai¹
(1. State Grid Mianyang Power Supply Company, Mianyang 621000, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:The defects found in the routine inspection of 110 kV three-winding transformer after power failure are introduced, which provides a typical case of precise diagnosis for transformer. According to the data of electrical test and oilification test as well as the live vibration test, a comprehensive analysis is carried out for the transformer. The results show that the medium voltage side (35 kV side) of transformer suffers from the current shocking resulting in winding deformation, and it is verified after disassembly. The accurate diagnosis of the transformer avoids a potential transformer accident, and the suggestions and maintenance experiences for the routine inspection and live testing are also given.
Key words:transformer; winding deformation; frequency response; short-circuit impedance; vibration test

0 引 言

电力变压器是电力系统中最重要设备之一,变压器的安全稳定运行,关系到整个电网的稳定工作。但随着中国城市化进程的加快,电动汽车、以电代煤等政策概念的推广,也使社会对电力负荷的需求急剧增加。由于复杂的负荷情况,变压器本身时刻承受着各种冲击,如何利用有限的停电时间,精准对变压器进行诊断,对电网的稳定运行有着重要意义。

据统计,绕组变形故障在变压器故障中占有相当大的比例^[1-2]。根据《国家电网公司十八项电网

重大反事故措施(修订版)》要求,110(66)kV 及以上电压等级变压器在出厂和投产前,应用频率响应法和低电压短路阻抗测试绕组变形以留原始记录。国家电网公司企业标准 Q/GDW 1168-2013《输变电设备状态检修试验规程》在变压器的诊断性试验项目中也对频率响应及短路阻抗试验做出了要求^[3-4]。

1 异常主变压器情况简介

该主变压器参数如表 1 所示,2008 年 5 月出厂,2009 年 1 月 13 日投入运行,2015 年 5 月 13 日例行检查工作中发现试验数据异常,其中压侧频率响应、短路阻抗、变压器绕组电容量等数据均出现了

异常,经判断绕组发生了变形的情况。

表 1 主变压器主要铭牌参数

名 称	参 数
型 号	SFSZ10 - 40000/110
联接组别	YNyn0d11
冷却方式	ONAF
额定容量	40/40/40 MVA
额定电压	110/38.5/10.5 kV
额定电流	209.9/599.8/2 199.4 A
空载电流	0.14%
负载损耗	228.63 kW
空载损耗	51.25 kW

1.1 频率响应试验

频率响应试验使用 HV - RZBX 型试验设备进行,测试信号选取 1 ~ 1 000 kHz 范围内。根据电力行业标准 DL/T 911 - 2004《电力变压器绕组变形的频率响应分析法》计算的相关系数分析,对相关系数 R 与变压器绕组变形程度关系做出规定如表 2 所示,同时规定 1 ~ 100 kHz 为低频段,100 ~ 600 kHz 为中频段,600 ~ 1 000 kHz 为高频段。

表 2 相关系数 R 与变压器绕组变形程度关系

绕组变形程度	相关系数 R
严重变形	$R_L < 0.6$
明显变形	$0.6 \leq R_L < 1.0$ 或 $R_M < 0.6$
轻度变形	$1.0 \leq R_L < 2.0$ 或 $0.6 \leq R_M < 1.0$
正常绕组	$2.0 \leq R_L$ 和 $1.0 \leq R_M$ 和 $0.6 \leq R_H$

注: R_L 为曲线在低频段内的相关系数; R_M 为曲线在中频段内的相关系数; R_H 为曲线在高频段内的相关系数。

测试数据显示,高压侧各频段曲线吻合度较高,中频段曲线吻合度稍差,但是仍在合格范围内,如图 1 所示。

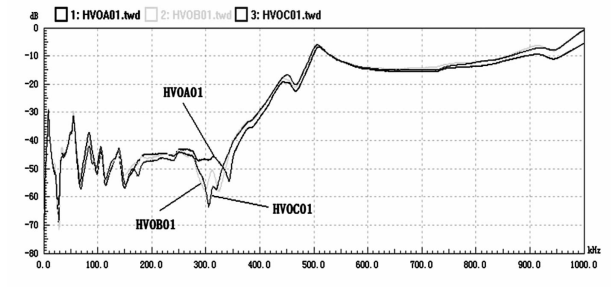


图 1 高压侧绕组频率响应曲线

表 3 高压侧频率响应曲线相关系数

相关系数 R_{xy}	R_{21}	R_{31}	R_{32}
低频段 R_{LF}	1.539	1.283	1.385
中频段 R_{MF}	1.728	1.611	2.205
高频段 R_{HF}	2.176	2.036	2.420

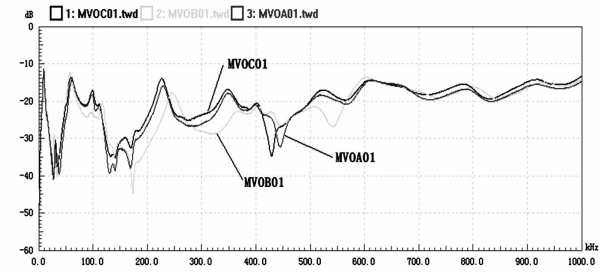


图 2 中压侧频率响应曲线

中压侧频率响应曲线显示,整个中低频段三相曲线的吻合度较差,通过相关系数的计算值发现,低频段相关系数 R_{21} 小于 1.0,中频段相关系数 R_{21} 、 R_{23} 均小于 0.6,即在中压侧绕组的中、低频段均存在明显变形的迹象,如图 2 所示。

表 4 中压侧频率响应曲线相关系数

相关系数 R_{xy}	R_{21}	R_{31}	R_{32}
低频段 R_{LF}	0.911	1.651	1.152
中频段 R_{MF}	0.520	1.091	0.360
高频段 R_{HF}	0.759	0.902	0.735

低压侧曲线显示,在曲线的 50 ~ 400 kHz 及 550 ~ 700 kHz 部分吻合度较低,分布于曲线的低频段、大部分中频段和高频段的小部分。通过相关系数的计算显示,低频段 R_{21} 小于 1,有明显变形现象;中频段 R_{21} 、 R_{31} 、 R_{32} 均小于 1,有轻度变形现象,如图 3。

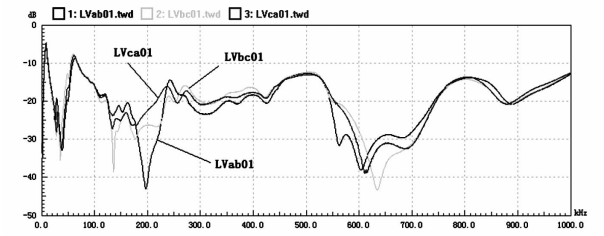


图 3 低压侧频率响应曲线

表 5 低压侧频率响应曲线相关系数

相关系数 R_{xy}	R_{21}	R_{31}	R_{32}
低频段 R_{LF}	0.950	1.510	1.401
中频段 R_{MF}	0.645	0.642	0.914
高频段 R_{HF}	1.145	1.850	1.326

低频段出现异常,通常表明该绕组电感量发生了明显变化,可能存在匝间或饼间短路情况;中频段则反映出绕组分布电感和电容的变化,如出现异常通常预示绕组发生扭曲和鼓包等局部变形现象。

1.2 低压短路阻抗试验

高压对中压短路阻抗测试值为 10.516%,出厂铭牌值为 10.04%,初值差(铭牌值为初值,下同)为 4.74%;高压对低压短路阻抗测试值为 18.106%,

出厂铭牌值为 18.38%，初值差为 -1.49%；中压对低压短路阻抗测试值为 5.916%，出厂铭牌值为 6.65%，初值差为 -11.20%。高压对中压以及中压对低压测试数据与铭牌值误差已经大于 ±2%，超出国家电网公司企业规程要求警示值。鉴于有中压侧参与的数据均出现异常，可初步判断中压侧应存在变形情况。数据如表 6 所示。

表 6 主变压器短路阻抗测试数据

测试部位	铭牌值	测试值	误差
高 - 中	10.04%	10.52%	4.74%
高 - 低	18.38%	18.11%	-1.49%
中 - 低	6.65%	5.91%	-11.20%

注：短路阻抗测试数据已经换算至 75℃。

1.3 本体电容量及介损测试

相较于 2010 年 6 月测试数据，电容量变化较大，超过 ±5% 时应该引起注意，而介损值变化率很小，基本可以忽略，详见表 7、表 8。测试数据表明中、低压侧绕组出现了绕组位移现象，但是变压器绕组并未出现能引起变压器油过热现象。

表 7 主变压器绕组电容量测试数据

测试项目	2010 年测试值 /pF	2015 年测试值 /pF	变化率 /%
高对中低地	12 610	12 590	-0.16
中对高低地	25 100	23 630	-5.86
低对高中地	25 300	23 780	-6.01

表 8 主变压器绕组介损测试数据

测试项目	2010 年 测试值/%	2015 年 测试值/%	变化率 /%
高对中低地	0.22	0.25	+0.03
中对高低地	0.24	0.30	+0.06
低对高中地	0.23	0.31	+0.08

1.4 中、低压侧直流电阻试验

该变压器中、低压侧的直流电阻值见表 9。中压侧直流电阻三相线间互差小于 2%，低压侧直流电阻三相相间互差小于 1%，未见异常。

表 9 中、低压侧直流电阻试验数据

测试部位	测试值/mΩ	不平衡率/%
中压侧	AO 60.500	0.93
	BO 60.230	
	CO 60.790	
低压侧	ab 7.398	0.43
	bc 7.401	
	ca 7.430	

1.5 振动测试

振动测试中，在变压器的两面布置了 28 个测点，检测点避开加强筋，垂直分布在 1/3 和 2/3 的位

置，见图 4。利用变压器振动检测系统，分别采集 1 s 内的振动信号进行分析，发现在测点 5、6，测点 11、12 以及测点 19、20，测点 25、26 的振动声纹特征存在明显异常。

通过振动检测分析，在异常测点所测信号频谱的高频分量增多，图 5 为变压器表面正常测点和异常测点的时频分布差异，图中可见，正常测点持续存在的为 100 Hz 和 200 Hz 分量；异常测点，除了 100 Hz 和 200 Hz 分量以外，还持续存在 300 Hz 和 400 Hz 分量，高频分量增多且长时间持续存在。图 6 为变压器表面正常测点和异常测点的声学指纹差异，可见正常测点变压器的声学振动指纹只有规则的两圈，而异常测点，除了规则的两圈之外，在外围还有更多的指纹分布，差异明显。由此可见，变压器内部绕组存在一定程度的变形或松动，导致变压器表面的振动声学特征明显异常。



图 4 变压器的测点分布

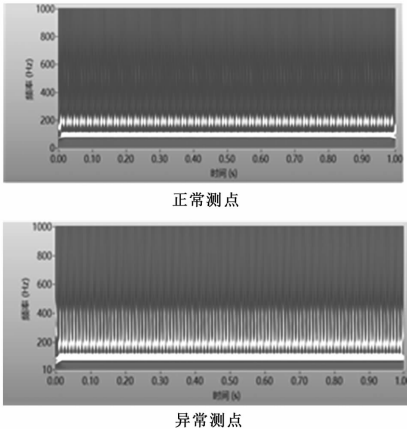


图 5 变压器表面正常测点和异常测点的时频分布差异

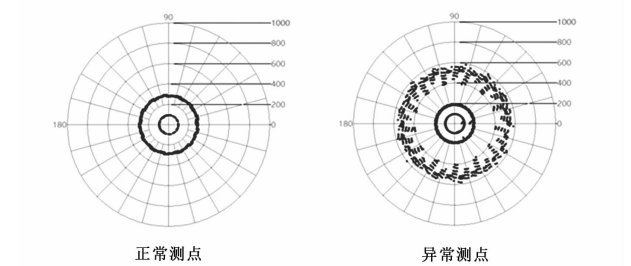


图6 变压器表面正常测点和异常测点的声学指纹差异

从检测结果分析,变压器表面一些部位的振动特征存在明显区别,进一步印证内部绕组存在一定程度的变形。

2 试验数据综合分析

从频率响应的情况来看,中、低压侧绕组均存在变形情况,中压侧绕组变形的程度可能要严重一些,短路阻抗测试的数据也表明,有中压绕组参与的数据均出现了明显异常;结合绕组电容量、介质损耗测试,中、低压侧绕组整体电容量变化较大,而所有介质损耗基本没有变化;变压器振动测试中,变压器表面的振动声学特征明显异常,而变压器表面的振动与变压器绕组及铁心的压紧情况、位移及变形状况密切相关;直流电阻值正常,油化试验的各项例检及跟踪数据中亦无明显异常,各种气体成分产气速率也都正常,可以排除绕组出现匝间或饼间短路及绕组烧损的情况。

综合以上数据分析,可以认定该主变压器绕组在外力作用下发生了比较明显的变形,结合主变压器历史运行负荷较小,主变压器中压侧(也可能有低压侧)绕组应可能是经受一次或数次短路电流冲击,在巨大短路电流产生的电动力影响下,绕组线圈发生了结构上的形变,但未产生绕组过热、短路、烧蚀等现象。

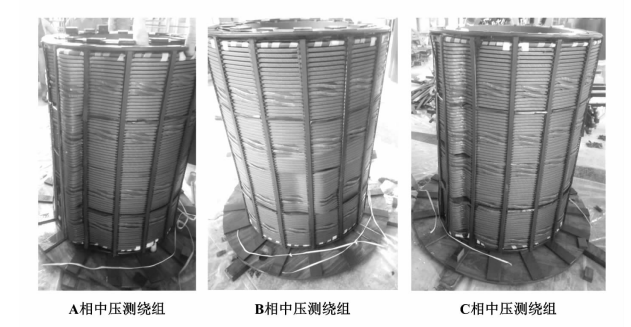


图7 三相中压侧绕组变形情况

3 解体检查

该变压器解体吊罩后发现内部干净程度较好,没有可见的放电烧蚀痕迹,三相绕组及110 kV有载分接开关、35 kV无载分接开关外观状况良好。最外层高压绕组线圈外观良好,绕线线圈洁净,形状规则。高压绕组取下后,发现中压绕组线圈有非常明显的鼓包和扭曲变形,但总体干净,其中A、C相形变较严重,B相略轻,如图7所示。

分离中低压侧绕组时,由于A、C相中压侧绕组变形比较严重,与内部低压绕组互相挤压,致使不能顺利地将中低压侧分离,只有B相分离成功。B相低压侧分离后显示有一些轻微的变形,应是受中压侧挤压所致,如图8所示。

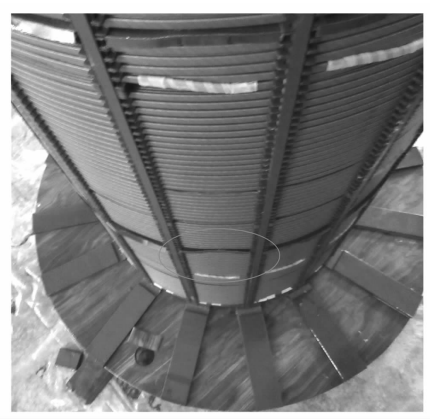


图8 B相低压侧绕组变形情况

解体结果表明,该变压器应该为中压侧绕组遭受短路电流等大电流冲击后,在强大的电动力作用下发生了明显的变形,但是可能遭受冲击电流过程时间较短,未形成短路过热等过程。由于绕组变形存在积累效应,考虑到中低压绕组已经严重变形并且已经互相挤压,设备若继续运行将很可能造成重大的电网事故。

这次通过对变压器试验数据的综合判断,及时判定变压器内部存在绕组变形情况,并对产生变形的情况以及程度进行准确分析,有效避免了一起变压器设备的潜伏性事故。

4 结 论

根据频率响应试验、低压短路试验、本体电容及介损试验、中低压侧直阻试验以及振动带电检测检

测的实验结果,通过综合分析判断该变压器绕组存在变形,并解体印证。通过上述变压器绕组变形故障的判断处理,发现在试验中对于不合格的试验结果,应从多个方面综合分析,对后期检修工作的开展具有指导意义。对于变压器绕组状态的评估分析试验应重视现场检测试验的数据分析,才能为后期检修工作提供有针对性和有效性的方案,从而降低检修成本,维护设备和电网的健康稳定运行。

参考文献

[1] 国家电网公司. 输变电设备状态检修试验规程: Q/GDW 1168 - 2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

[2] 国家能源局. 输变电设备状态检修试验规程: DL/T 393 - 2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[3] 王梦云. 2004 年度 110 kV 及以上变压器事故统计分析[J]. 电力设备, 2005, 6(11): 31 - 37.

[4] 胡勇, 程蕾. 大型电力变压器故障实例统计分析[J]. 电力安全技术, 2003, 5(1): 20 - 21.

[5] 于洋, 耿宁, 陈勇强, 等. 一起 220 kV 变压器绕组变形

缺陷的诊断分析与解体验证[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 172 - 176.

[6] 汲胜昌, 刘味果, 单平, 等. 变压器缺心及绕组状况的振动测试系统[J]. 高电压技术, 2000, 26(6): 1 - 3.

[7] 王世山, 汲胜昌, 李彦明. 利用振动法进行变压器在线监测的应用研究[J]. 变压器, 2002, 39(s1): 73 - 76.

[8] 程锦, 李延沐, 汲胜昌, 等. 振动法在线监测变压器绕组及铁心状况[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 43 - 45.

[9] 王庆龙. 电力变压器振动监测方法研究[D]. 成都: 西华大学, 2006.

[10] 周建平, 林爱弟, 吴劲晖, 等. 电力变压器振动监测的测点位置选择[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(12): 1100 - 1108.

[11] 杨玥, 汪鹏, 顾宇宏, 等. 利用绕组电容量及短路阻抗试验综合判定变压器绕组变形方法分析[J]. 内蒙古电力技术, 2016, 34(6): 1 - 5.

作者简介:

吴波(1988), 电气试验技师, 主要从事电气试验方面的工作和研究。
(收稿日期: 2017 - 10 - 19)

(上接第 35 页)

[3] 邵丽华, 章竹耀, 张春龙, 等. 储能电池荷电状态与平抑风电出力波动协调运行策略[J]. 电力建设, 2017, 38(1): 84 - 88.

[4] 娄素华, 吴耀武, 崔艳昭, 等. 电池储能平抑短期风电功率波动运行策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 17 - 22.

[5] Cong - Long Nguyen, Hong - Hee Lee. A Novel Dual - battery Energy Storage System for Wind Power Applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6136 - 6147.

[6] 章竹耀, 郭晓丽, 张新松, 等. 储能电池平抑风功率波动策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 62 - 68.

[7] 何川, 刘天琪, 胡晓通, 等. 基于超短期风电预测和混合储能的风电爬坡优化控制[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 782 - 790.

[8] 吴雄, 王秀丽, 李骏, 等. 风电储能混合系统的联合调度模型及求解[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 10 - 17.

[9] 程世军. 风电场储能系统的优化配置及运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.

[10] 侯婷婷. 含大规模风电的电力系统储能电源优化配置研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.

[11] 谢应昭, 卢继平, 翁宗林, 等. 改善风电输出功率特性的复合储能系统优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2052 - 2058.

[12] 王颖, 张凯锋, 付嘉渝, 等. 抑制风电爬坡率的风储联合优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 17 - 23.

[13] Zhang X, Yuan Y, Hua L, et al. On Generation Schedule Tracking of Wind Farms with Battery Energy Storage Systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 8(1): 341 - 353.

[14] 杨珺, 张建成, 黄磊磊, 等. 基于改进粒子群算法的独立光伏发电系统储能容量优化配置研究[J]. 华东电力, 2012, 40(8): 1370 - 1374.

[15] Wang Yi, Jiang Hanhong, Xing Penxiang. Improved PSO - based energy management of Stand - alone Micro - grid under Two - time Scale[C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2016: 2128 - 2133.

作者简介:

戴长春(1973), 硕士、高级工程师, 从事电网调度运行工作;
章怡帆(1994), 硕士研究生, 研究方向为风电系统优化运行与控制。
(收稿日期: 2017 - 09 - 12)

220 kV 高压预制式电缆中间接头故障分析与处理

刘凤莲¹, 薛志航¹, 邓元实¹, 朱 轲¹, 张涵轶², 杜 颢²

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

摘要:以某 220 kV 高压电缆中间接头在试送电、交流耐压试验过程中多次发生绝缘击穿的现象为研究对象, 对比分析了接头内的放电通道和施工工艺等问题。故障接头解体后, 基于放电通道均起始于导体接续管外的半导电带边缘处、均存在沿面放电等特征, 认为供应商在关键部位变更产品的施工工艺, 即绝缘预制件的扩径方法、导体接续管外的处理工艺, 造成产品安装后无法达到设计性能, 是造成本次事故的主要原因。

关键词:高压电缆; 预制式电缆中间接头; 扩径工艺; 故障分析

中图分类号:TM854 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)01-0044-05

Fault Analysis of 220 kV High – voltage Prefabricated Cable Joint and Its Treatment

Liu Fenglian¹, Xue Zhihang¹, Deng Yuanshi¹, Zhu Ke¹, Zhang Hanyi², Du Hao²

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

Abstract:The insulation breakdown of 220 kV high – voltage prefabricated cable joint, which occurs several times during the trial line charging and AC voltage withstand test process, is analyzed. The comparisons of discharge channels, installation procedures etc. are done to find out the main reason of joint faults. After the disassembly of broken – down joints, similar features are found. Discharge channels starts at the edge of semiconducting band which is winded around the metal connecting pipe, and surface discharges on the main insulation of cable are found in each broken – down joint. The installation procedure in critical parts is found to be changed, such as the expanding process of prefabricated cable joint and the treatment process of metal connecting pipe. Based on these phenomena, it is concluded that the change of installation procedure in critical parts, which leads to poor performance of the prefabricated cable joint after installation, is the main reason of insulation breakdown.

Key words:high – voltage cable; prefabricated cable joint; expanding process; fault analysis

0 引 言

高压电力电缆在城市地下电网、发电厂、变电站等场所应用广泛,但近年来,随着新建电缆工程的快速扩张,高压电缆及接头故障频发,严重影响了电网的安全可靠运行。历数近年的几起重大电网事故,均由电缆故障引起,造成的经济损失巨大、社会影响严重^[1-8]。如 2013 年 6 月上海 500 kV 三静 5191 电缆线路接头发生故障击穿引起地铁停运;2016 年 6 月陕西 110 kV 韦曲变电站 35 kV 出线电缆接头故障引起电缆沟失火;2016 年 8 月大连 66 kV 电缆接

头故障后引起同通道内电缆烧损短路跳闸等。

由于电缆及附件的绝缘设计裕度较大而有效的检测方法少,安装过程中产生的潜在缺陷,通常难以通过绝缘电阻、交流耐压等常规交接试验发现,此类高压电缆接头若运行于城市电网的重要干线中,将严重威胁着电网的安全稳定。下面以某地由某附件供应商统一安装的 220 kV 电缆中间接头造成的多次绝缘击穿故障为研究对象,对比分析了接头的解体情况和施工工艺等问题,深度剖析了电缆线路的中间接头频繁出现绝缘击穿的根本原因,以期为高压电缆的安装、管理提供借鉴参考。

1 电缆中间接头故障基本情况

某 220 kV 甲、乙电缆线路为两变电站的共通道联络线,互为备用线路,线路均敷设于隧道内,型号为 YJLW02-127/220-1×2 000 mm²,各含中间接头 5 组以及 GIS 终端和户外终端各 1 组。

甲线 3 号电缆接头 B 相在线路新投时,发生绝缘击穿故障,接头起火,并引起临近电缆损伤。故障后,对修复后的电缆线路按照国家电网公司企业标准 Q/GDW 11316-2014《电力电缆线路试验规程》的相关规定,重新进行 1.7U₀ (216 kV) 耐压试验时,甲线 5 号接头 C 相(非抢修接头)在升压至 151 kV 时发生绝缘击穿,A、B 相电缆通过耐压试验;而乙线 5 号接头 A 相(非抢修接头)在升压至 189 kV 时发生绝缘击穿。甲线 3 号电缆接头烧损严重,已无法辨识接头内放电通道,如图 1 所示。



图 1 甲线 3 号电缆接头 B 相烧损严重

经核对,甲、乙线电缆接头均由同一电缆附件供应商 A 供货,并负责安装。但甲、乙线实际采用的并不是 A 供应商生产的硅橡胶绝缘预制件,而是采用 B 供应商生产的以三元乙丙橡胶为主绝缘的预制件。

2 电缆中间接头的解体分析

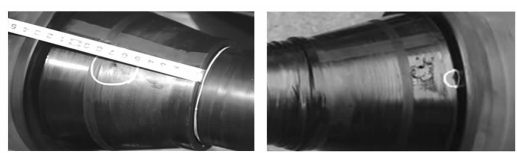
由于甲线 3 号故障电缆接头烧损严重,难以辨识放电通道,因此选取在耐压试验过程中发生绝缘击穿的甲线 5 号接头 C 相、乙线 5 号接头 A 相进行了对比分析。

2.1 电缆中间接头的击穿现象分析

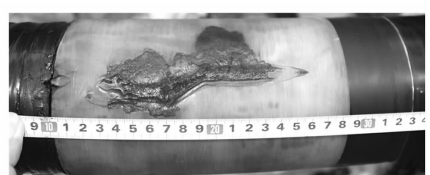
解剖过程中发现,甲、乙线 5 号接头外观均完好,接地铜壳内防水胶未见破损,去除接地网外的绕包带材后,发现绝缘预制件半导体层断开侧的端部存在绝缘击穿点,击穿点孔径均较小,如图 2 所示。

接头内电缆表面放电痕迹如图 3 所示。放电点均起始于电缆主绝缘断口与金属导体连接处,经绝缘预制件,沿预制件与电缆主绝缘间的界面延伸发

展,在主绝缘表面、预制件内表面均形成明显的放电发展通道。



(a) 甲线 5 号电缆接头 (b) 乙线 5 号电缆接头
图 2 甲、乙线耐压试验中形成的击穿点



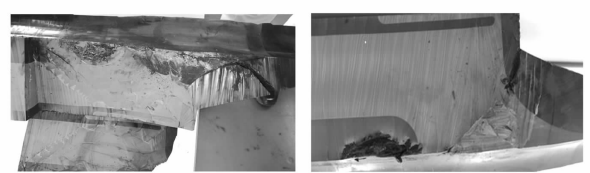
(a) 甲线 5 号电缆接头



(b) 乙线 5 号电缆接头

图 3 甲、乙线故障接头内电缆表面烧损情况

对绝缘预制件放电位置进行切片观察,可见放电点均起始于高压导体连接管半导体带绕包端部与预制件内半导体屏蔽体的接触处,当电弧发展到预制件靠近零电位的端部半导体体后,由于绝缘距离不足,电弧经预制件内部的主绝缘三元乙丙橡胶,形成贯穿性放电通道,如图 4 所示。



(a) 甲线 5 号接头 (b) 乙线 5 号接头

图 4 甲、乙线电缆接头故障击穿面

2.2 电缆及接头的施工安装工艺分析

事故发生后,根据供应商先后提供的 A、B 两种电缆接头安装说明书,发现甲、乙线电缆接头采用的施工工艺与供应商 B 的初始安装工艺存在差异,在关键部位的施工工艺存在变动。

2.2.1 电缆接头关键部位的施工工艺变更

1) 绝缘预制件的扩径方法不同

供应商 A 对供应商 B 生产的三元乙丙橡胶绝缘预制件扩径方法,沿用了其对硅橡胶预制件的扩径方法,即在对电缆预处理后,通过导向锥,用链条葫芦将预制件拉到电缆一侧,压接好导体接续管、包

绕半导体带后,再将预制件拉到中间连接处,扩径方法如图5所示。

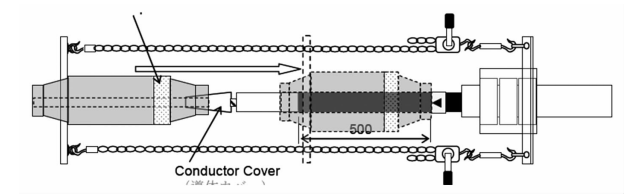


图5 供应商A对绝缘预制件的扩径方法

供应商B采用的是通过专用扩张工具对预制件预扩径后,密封保存,并于4 h内使用。扩张时,沿着导引杆,套好锥头、扩张管,并把导引杆支撑固定到小车上。待处理完中间接续管后,将预扩张的绝缘套装在电缆上,定位准确后,拔出扩张管,使预制件收缩在电缆上,其扩径示意图见图6。

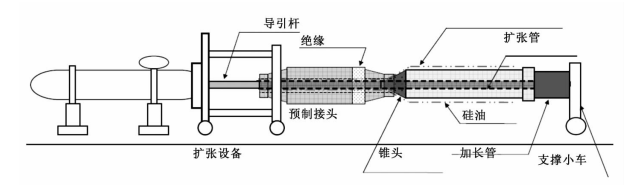


图6 供应商B对绝缘预制件的扩径方法

绝缘预制件扩径方法的差异会影响橡胶件的收缩性和受力的均匀性,且拖拉方式容易将预制件内侧未处理干净的杂质带到绝缘表面,引起沿面放电。

2) 金属导体接续管外的处理工艺不同

供应商A沿用其绕包带材的旧工艺,即甲、乙线电缆接头仍是在导体连接管外侧绕包半导体带,如图7(a)所示。接续管外采用半导体带绕包的方式对安装人员的绕包工艺要求高,若绕包不良而形成较多缝隙,则局部区域绝缘电阻偏大,会改变半导体带内的电场分布,引起局部放电。而供应商B的电缆接头采用的是在高压导体连接管外安装金属屏蔽罩形成等电位空间的处理方式,工艺相对简化,如图7(b)所示。

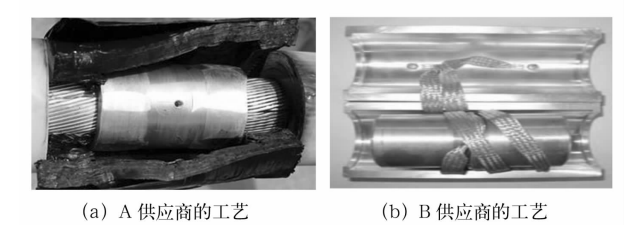


图7 金属接续管外处理工艺

此外,解体中发现乙线5号接头内绕包的半导体带封口处已翘起,未按工艺要求将尾端压入已缠好的半导体带下方,但不排除是在预制件扩径时拖

拉过程中造成的可能性。

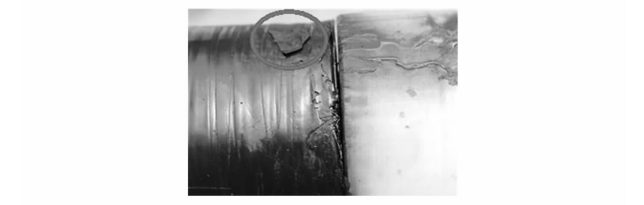


图8 乙线5号接头内半导体包带封口翘起

2.2.2 电缆封铅工艺差引起本体灼伤

在乙线5号电缆接头解体过程中发现,接头两侧封铅处的电缆本体上均有铝护套压成的凹痕,电缆本体严重烧伤,见图9。烧灼现象说明接头安装人员对封铅工艺控制不佳,封铅时间过长,导致电缆过热、灼烧,长期运行后可能会引起本体击穿故障。

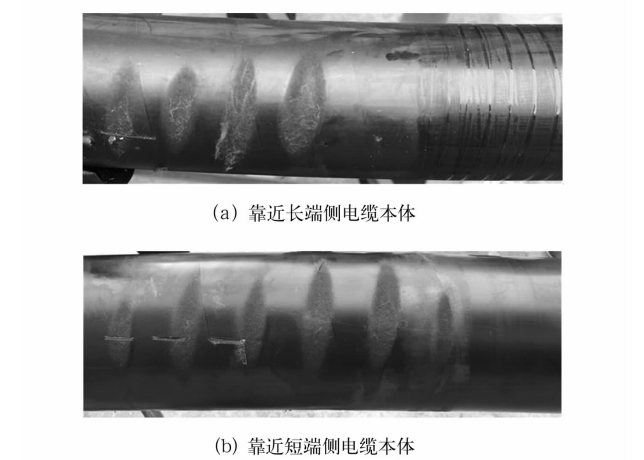


图9 乙线5号电缆接头封铅处电缆本体上烧灼痕迹

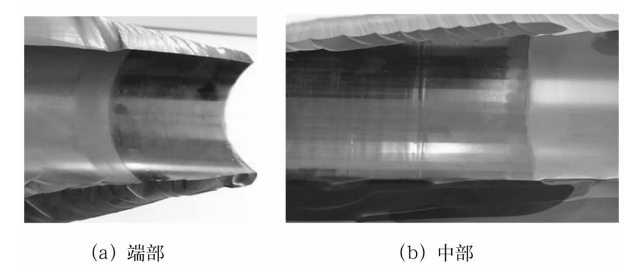
除以上问题外,经核对,甲、乙线5号接头的安装尺寸均在厂家工艺要求范围内,绝缘预制件均与电缆本体有效搭接,未见明显异常。

3 电缆接头产品设计、质量分析

在甲、乙线5号接头解体过程中,发现绝缘预制件中部和端部的半导体体与绝缘体的交界面情况不同。端部的绝缘材料与半导体体交界面为平直过度,用万用表粗测,绝缘材料电阻为 ∞ ,半导体材料电阻约为1~20 k Ω ,两种材料分界明显;而预制件中部的交界处基本平直,但表层略呈灰色波纹状,交界处的电阻约为2~30 M Ω ,介于半导体体与绝缘体之间,为生产过程中打磨所致。打磨处理后,若残留碎屑未清理干净,容易在预制件扩张的拖、拉过程中将半导体颗粒等杂质带到电缆绝缘表面,引起沿面放电。

在事故的后续分析处理中,尝试对绝缘预制件

材料进行检测,但由于三元乙丙橡胶材料性质偏硬、颜色较深,通过切片等进行材料分析的效果不佳。虽材料性能检测受限,但结合 B 供应商生产的电缆接头在国内电网运行多年故障发生率较低、总体运行情况较好的客观事实,基本可排除该产品在设计、质量方面的问题。

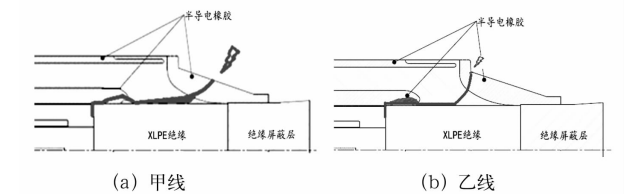


(a) 端部 (b) 中部

图 10 乙线接头内部绝缘材料与半导体界面

4 电缆及接头故障的主要原因分析

根据两个电缆接头的解体情况,绘制对应的放电击穿通道示意图 11 所示。放电点均起始于高压导体连接管半导体带绕包端部与预制件内半导体屏蔽接触处,高压电位经半导体屏蔽引至圆弧形端部后,沿预制件与电缆本体间的界面形成沿面放电。当电弧发展到预制件靠近零电位的端部半导体体后,由于绝缘距离不足,电弧经预制件内部的主绝缘三元乙丙橡胶,形成贯穿性放电击穿通道。



(a) 甲线 (b) 乙线

图 11 甲、乙线 5 号电缆接头击穿通道示意图

故障接头解体后,发现击穿后的接头内部现象类似,放电通道类似,在电缆本体表面和预制件内形成的烧蚀痕迹也类似,因此判断事故为同一原因引起。基于放电均起始于导体接续管外半导体带边缘处、电缆主绝缘表面均存在沿面放电的特征,认为绝缘预制件的扩径方法、导体接续管外的工艺变更与接头多次在耐压试验中发生击穿有主要关系。

三元乙丙橡胶绝缘预制件的生产过程中,由于材料较硬,成型后存在的毛边需打磨处理。若打磨后的残留碎屑未清理干净,容易在预制件扩张的拖、拉过程中将半导体颗粒等杂质带到电缆绝缘表面,

引起沿面放电。因此接头产品的生产工艺须与其安装方法相匹配,在未经供应商 B 或其他正规检测机构认可的情况下,随意变更电缆接头的关键施工工艺,无法保证绝缘预制件安装后仍能达到设计性能。

根据 GB/T 18890 - 2015《额定电压 220 kV ($U_m=252$ kV) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件》的相关要求,当包含附件安装工艺在内的制造工艺发生改变,且这种改变可能会对产品性能产生不利影响时,应对电缆系统重新进行型式试验,否则不应直接应用于电缆工程。

5 结 论

1) 220 kV 甲、乙线电缆接头故障率高,解体现象类似,放电击穿通道一致。基于放电均起始于导体接续管外半导体带边缘处、均存在沿面放电的特征,认为供应商 A 在关键部位随意变更供应商 B 的施工工艺,即绝缘预制件的扩径方法、导体接续管外的处理工艺,造成产品安装后无法达到设计性能,是造成本次事故的主要原因。

2) 电缆接头的生产工艺须与其安装方法匹配,当包含附件安装工艺在内的制造工艺发生改变,且这种改变可能会对产品性能产生不利影响时,应对电缆系统重新进行型式试验,否则不应直接应用于电缆工程。

3) 建议尽快建立健全电力行业内电缆接头制作的培训、取证、认证等系列管理模式,加强对接头制作工艺过程的有效监督管理,从源头降低电缆接头故障发生率。

4) 鉴于本次电缆接头故障引起同通道内其他邻近电缆线路烧损,建议在多回高压电缆运行的电缆通道内,完善防火防爆措施,对在建、新建、迁改的高压电缆线路,在投运前应同步完成通道内防火防爆措施的全覆盖。此外,建议在物质采购环节,增加在高压电缆接头内须使用非可燃性填充胶的要求,从源头降低电缆及通道内火灾风险,避免电缆群伤。

参考文献

[1] 段肖力,汤美云,林峰,等. 220 kV 电缆中间接头主绝缘击穿事故分析[J]. 高压电器,2009,45(16):142 - 144.
[2] 边航,王金锋,杨大渭,等. 一种容易被误判的 XLPE 电缆附件故障机理[J]. 电线电缆,2016(6):30 - 32.

[3] 杨代勇,刘俊博,张益云,等. 66 kV 电缆中间头击穿故障诊断及电场仿真分析[J]. 吉林电力,2016,44(5): 45-47.

[4] 姜芸,闵红,罗俊华,等. 220 kV 电缆接头半导体尖端缺陷的局部放电试验[J]. 高电压技术,2010,36(11): 2657-2661.

[5] 何泽斌,熊俊,王晓兵,等. 一起 220 kV 交联聚乙烯电缆中间接头故障原因分析及运行建议[J]. 广东电力, 2011,24(4):87-89.

[6] 黄顺涛. 一起电力隧道中 220 kV 电缆接头爆炸机理的研究及应对措施[J]. 企业技术开发,2015,34(36):82-85.

[7] 申积良,罗俊华,汤美云,等. 110 kV 电缆终端头爆炸

(上接第 38 页)

式同相供电系统的基本结构和原理的基础上,对交-直-交变流器展开了研究,得到以下结论:

1)采用载波移相 SPWM 的交-直-交变流器的贯通式同相供电系统能够彻底取消分区所的电分相环节,改善了传统牵引供电系统中存在的电能质量问题,有利于高速铁路的发展;

2)在同样容量的交-直-交变流器中,载波移相 SPWM 技术可以降低对电力电子器件耐压等级的限制,以达到节省成本的目的。

参考文献

[1] B. Busco, P. Marino, M. Porzio, et al. Digital Control and Simulation for Power Electronic Apparatus in Dual Voltage Railway Locomotives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2003,18(5):1146-1157.

[2] K. Hung-Yuan, C. Tsai-Hsiang. Rigorous Evaluation of the Voltage Unbalance Due to High-speed Railway Demands[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998,47(4):1385-1389.

[3] R. A. Otto, T. H. Putman, L. Gyugyi. Principles and Applications of Static, Thyristor-controlled Shunt Compensators[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems,1978,PAS-97(5):1935-1945.

[4] 王晖,吴命利. 电气化铁路低频振荡研究综述[J]. 电工技术学报,2015,30(17):70-78.

[5] 许志伟,罗隆福,张志文,等. 一种新型电气化铁道电能质量综合补偿[J]. 电工技术学报,2015,30(8): 265-272.

[6] 游广增,马斌,朱毅. 牵引变压器接线方式对谐波和负序的影响研究[J]. 电气技术,2014(3):14-18.

[7] 李群湛,贺建闽. 电气化铁路的同相供电系统与对称补偿技术[J]. 电力系统自动化,1996,20(4):9-11.

[8] 李群湛. 同相供电系统的对称补偿[J]. 铁道学报, 1991,13(s1):35-43.

事故分析[J]. 高电压技术,2005,31(11):74-75.

[8] 段建家,陈细玉,韦文榜,等. 110 kV 电缆接头故障分析及试验研究[J]. 湖南电力,2017,37(1):63-65.

[9] GB/T 18890.1-2015,额定电压 220 kV ($U_m=252$ kV) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件 第 1 部分:试验方法和要求[S].

[10] 徐应麟. 电线电缆手册第 2 册[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

作者简介:

刘凤莲(1986),工程师,主要从事电力电缆绝缘性能检测、状态评估、故障分析等工作。

(收稿日期:2017-11-04)

[9] 贺建闽,李群湛. 用于同相供电系统的对称补偿技术[J]. 铁道学报,1998,20(6):47-51.

[10] 吕晓琴,张秀峰. 基于有源滤波器的 V/x 结线的同相牵引供电系统[J]. 电力系统及其自动化学报,2006,18(6):73-78.

[11] 张睿. 贯通式同相供电系统电能变换器的研究[J]. 电气化铁道,2012(4):19-22.

[12] 常非,冯金博,赵丽平. 同相贯通牵引供电系统综合潮流控制器设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012,24(1):54-58.

[13] Minwu Chen, Qun-zhan Li, Guang Wei. Optimised Design and Performance Evaluation of New Cophase Traction Power Supply System[C]. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC),2009:1-6.

[14] Zhao Y, Zhao L, Li Q. Some Key Problems on Cophase Traction Power Supply Device[C]. International Forum on Information Technology and Applications, IEEE Computer Society, 2010:444-449.

[15] Shu Z, Xie S, Li Q. Single-Phase Back-To-Back Converter for Active Power Balancing, Reactive Power Compensation, and Harmonic Filtering in Traction Power System[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011,26(2):334-343.

[16] 王冬梅,王晨. 基于单台 YN,d11 变压器的同相 AT 供电系统[J]. 电气技术,2014,15(7):18-21.

[17] 卓放,胡军飞,王兆安. 采用多重化主电路实现的大功率有源电力滤波器[J]. 电网技术,2000,24(8):5-7.

[18] 林飞,杜欣. 电力电子应用技术的 MATLAB 仿真[M]. 北京:中国电力出版社,2009.

[19] 李群湛,贺建闽,解绍锋. 电气化铁路电能质量分析与控制[M]. 成都:西南交通大学出版社,2011.

作者简介:

郭晓宇(1970),本科、高级工程师,主要从事铁道供电相关研究工作。

(收稿日期:2017-09-04)

基于有限元的 35 kV 气体绝缘母线放电机理及改进方案研究

耿超,徐楠,李宁

(国网上海电力公司检修公司,上海 200122)

摘要:随着城市供电集约化的不断推进,气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)在城市变电站中的应用愈加广泛。而在特大型城市上海,有着大容量、集成化以及环境友好性等特点的 GIL 已经逐渐替代了敞开型母线,被大规模地应用于城区变电站中。但在运行过程中发生过多起 GIL 内支撑绝缘子局部放电故障。结合 35 kV 气体绝缘母线的专项技术改进工作,建立有限元模型对 GIL 支撑绝缘子局部放电产生机理进行仿真计算,提出一种改进技术方案并进行理论验证。仿真及实际运行结果显示,改进方案能够较好地解决支撑绝缘子放电故障,提高了运行的可靠性。

关键词:GIL;支撑绝缘子;局部放电;有限元

中图分类号:TM726.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)01-0049-04

Research on the Mechanism of Partial Discharge in 35 kV GIL and Improvement Scheme Based on Finite Element Modeling

Geng Chao, Xu Nan, Li Ning

(State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract:As the power supply intensity keeps growing in large cities, the gas-insulated metal-enclosed transmission line (GIL) has been widely used in urban substations. Especially in the ultra-large cities such as Shanghai, GIL has gradually substituted the traditional open-type bus benefited from its large capacity and smaller space demand. However, several partial discharge faults have occurred on the support insulator during the operation. A finite element model is established and the mechanism of partial discharge is simulated. With the calculation result, an effective improvement scheme is proposed. The model simulation and practical implementation show that the improvement scheme can eliminate the partial discharge on support insulator, which can greatly improve the operation reliability of GIL.

Key words:gas-insulated metal-enclosed transmission line (GIL); support insulator; partial discharge; finite element

0 引言

随着中国城市化进程的发展,中东部大型城市的人口密度持续增长,导致城市中心区域的耗电量逐年攀升。这使得在特大型城市城区建设高电压、大容量变电站成为城市发展的重要一步。然而,建设在人口密集的市中心变电站对占地面积、噪声控制、电磁环境控制等有着更加苛刻的要求。传统的敞开式设备所带来的占地面积大、电磁环境复杂等问题已经使其无法满足城市变电站的需要。

气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated

metal-enclosed transmission line, GIL)诞生于上世纪70年代^[1-2],其采用SF₆气体作为绝缘介质,金属筒体作为外壳,具有绝缘性能好、占地面积小、噪声小、载流量大、易于维护等特点。近年来被广泛应用于城市变电站,特别是在地下变电站中,用于电力变压器与开关的连接、气体绝缘电器的母线、高压穿墙套管等领域^[3-4]。

然而,GIL作为一种全封闭电器,导体与外壳同轴布置,壳体与带电导体间布置有多个支撑绝缘子,用以固定导体的相对位置,因此要求支撑绝缘子应同时具备良好的机械强度与电气绝缘性能。但长期的GIL运行经验表明,支撑绝缘子或绝缘盆的局部

放电现象是 GIL 故障的主要原因之一^[5-6]。

国内外众多学者对直流或交流 GIL 绝缘子的放电故障进行了深入研究。其中,文献[7]就直流 GIL 绝缘子表面电荷积聚对闪络特性的影响进行了研究,结果表明 GIL 绝缘子在直流电压下聚集的电荷使其闪络电压明显降低。文献[8]使用超声波法对 GIL 绝缘子局放原因进行诊断,并使用 X 射线法进行验证,准确查找到支柱绝缘子的本体缺陷。文献[9]基于有限元法建立了绝缘子准静态非线性模型,对绝缘子外形进行优化设计,比较研究了优化后对绝缘子表面电场聚集的抑制和改善。日本关西电力公司、四国电力公司等研究人员合作研究了 500 kV 直流 GIS 中绝缘结构的设计和优化问题,提出使用非线性直流场分析法来优化绝缘子设计,以提高其绝缘强度^[10]。

由上可见,目前针对 GIL 绝缘子放电的研究大多集中于以下两个方面:一是对直流 GIL 绝缘子表面电荷积累效应的研究;二是高电压等级 GIL 局放的检测技术研究。但针对中低电压等级交流 GIL 绝缘子放电现象的研究及抑制措施则少有文献涉及。而目前在上海众多市区变电站中,35 kV GIL 通管被广泛用作 GIS 电器的母线,运行过程中出现过多起支撑绝缘子放电故障。35 kV GIL 内支撑绝缘子结构与高电压等级 GIL 有显著区别。

下面以 35 kV GIL 通管支撑绝缘子为研究对象,结合现场解体检修实践,建立了 GIL 支撑绝缘子有限元模型,对绝缘子放电机理进行仿真计算,以探究 35 kV GIL 绝缘子端部放电的理论机理。同时提出一种简洁有效的改进方案,并成功地应用于实际检修工作中。理论模型验证及实际运行结果表明,所提出的改进方案能够较好地解决绝缘子端部放电故障。

1 理论基础

1.1 静电场的有限元分析法

为讨论 35 kV GIL 支撑绝缘子的放电现象,可以建立二维静电场分析模型。二维静电场问题满足拉普拉斯方程及如下边界条件:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \in \Omega \\ \varphi|_{S_1} = \varphi_0 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_{S_2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Ω 为计算场域; φ 为电位; ρ 为体电荷密度; φ_0 为第 1 类边界条件给定电位; S_1 、 S_2 分别为第 1 和第 2 类边界。

使用伽辽金余量法求解,取 φ 的近似解 $\tilde{\varphi}$,则有余量方程为

$$R(\tilde{\varphi}) = A\tilde{\varphi} - \rho \quad (2)$$

式中, $A = -\varepsilon \nabla^2$ 。

将场域 Ω 剖分为 z_0 个单元、 N_0 个节点,区权函数为 W_p ,则有加权有限元余量函数为

$$\begin{aligned} \langle W_p, R(\tilde{\varphi}) \rangle &= \int_{\Omega} W_p, R(\tilde{\varphi}) d\Omega \\ &= \sum_{e=1}^{z_0} \int_{\Omega_e} W_p, R(\tilde{\varphi}) d\Omega \end{aligned} \quad (3)$$

求解式(3)加权余量函数即可求得有限元模型各个单元处的电位。

1.2 有限元实体建模

针对广泛使用的 MGC 型 35 kV GIL 通管内支撑绝缘子的实际尺寸,建立二维有限元模型。绝缘子实体与有限元模型见图 1、图 2。

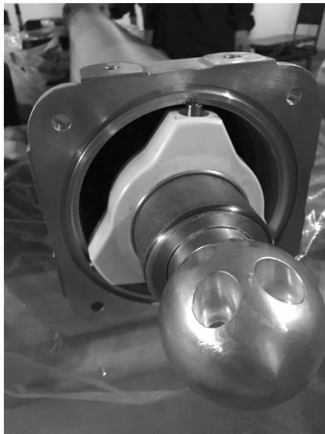


图 1 MGC 型 35 kV GIL 通管绝缘子装配图

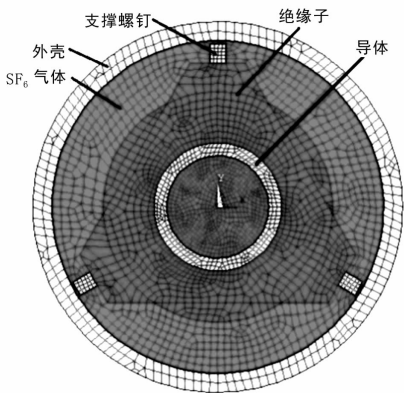


图 2 二维有限元模型

模型采用静电场分析,边界条件为中间导体施加额定工作电压,筒体为零电位。

2 绝缘子局部放电理论仿真

由绝缘子实际结构及有限元模型可见,铜制导体穿过绝缘子中心,绝缘子对铜导体起支撑作用。绝缘子 3 个支撑点通过金属支撑螺钉与 GIL 外壳接触。正常情况下,3 个金属螺钉均应当与外壳接触,电位为 0。正常工况下,GIL 内部电场分布如图 3 所示。同时,GIL 内部电压分布见图 4。

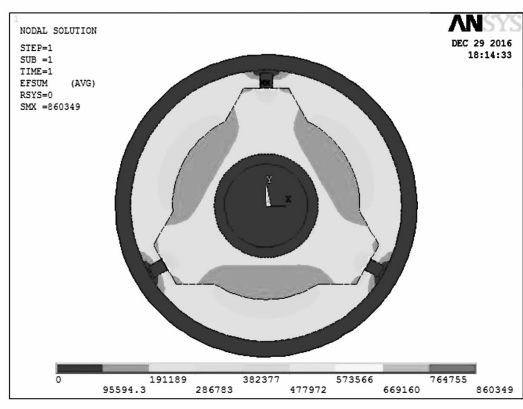


图 3 正常工况下 GIL 内部电场分布

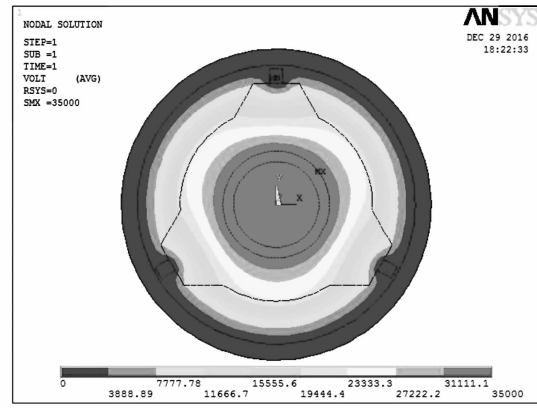


图 4 正常工况下 GIL 内部电压分布

由图 3、图 4 可见,正常工况下,GIL 内部电场分布均匀,没有出现明显的电场畸变。而内部电压由中心导体 35 kV 到外壳零电位均匀递减。绝缘子本体由高性能环氧材料组成,承担了大部分的电压降,具有良好的介电特性,剩余电压降也在周围 SF₆ 气体中逐渐降低至零电位。因此正常情况下,绝缘子表面不易发生局部放电现象。

GIL 正常工作时,由于中心导体自重的原因,绝缘子的三颗支撑螺钉中,底部的两颗螺钉一般能够与筒体紧密接触,但顶部的一颗螺钉往往与外壳筒体会产生一定的微小缝隙。

在实际检修工作中,发生了多起因绝缘子支撑螺

钉与外壳筒体间没有良好接触导致的局部放电现象。现场中发现的绝缘子局部放电痕迹如图 5 所示。



图 5 现场绝缘子局部放电痕迹

由图 5 可见,外壳上端部出现了明显黑色烧蚀痕迹(为方便观察,现场将绝缘子翻转了一定角度,黑色部分原为绝缘子支撑螺丝位置),可以确定支撑绝缘子的上端支撑螺丝与筒体之间发生了局部放电。

利用有限元模型对该种工况进行理论仿真,得到支撑螺钉接触不良情况下,GIL 内部电场分布如图 6 所示,内部电压分布如图 7 所示。

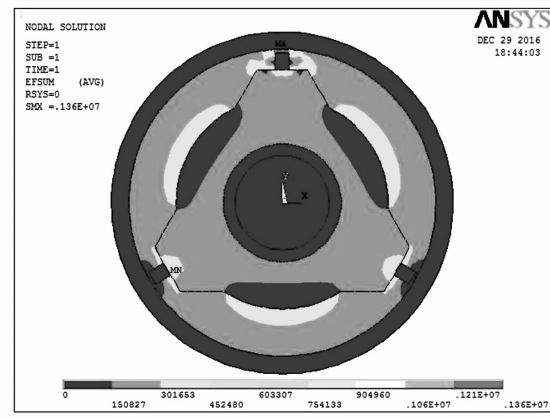


图 6 螺钉接触不良时 GIL 内部电场分布

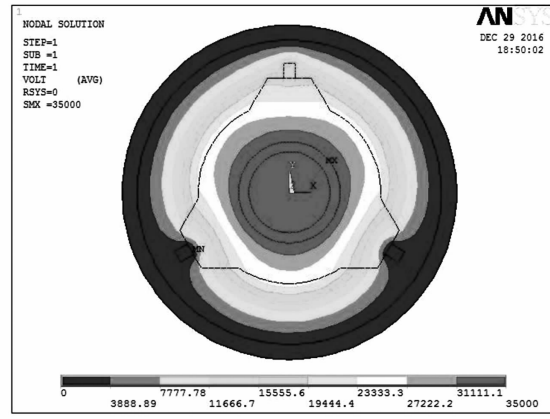


图 7 螺钉接触不良时 GIL 内部电压分布

由图6、图7可见,当螺钉与外壳筒壁接触不良时,两者缝隙间将产生明显电场畸变。缝隙中的电场强度最高达 1×10^6 V/m。而螺钉与外壳间的电压差达到15 kV左右。因此在缝隙中极易发生放电现象。仿真结果与现场放电现象吻合性良好,验证了所建立的有限元模型的有效性。同时,仿真结果为绝缘子放电现象的产生机理提供了有力的理论支撑。

3 绝缘子支撑的改进方案

为了解决绝缘子支撑螺钉与筒体外壳接触不良的缺陷,提出了一种易于施工的改进措施。即在绝缘子支撑螺钉末端钻孔,放入一只金属弹簧。金属弹簧位于螺钉与筒壁之间呈受压状态。若支撑螺钉与筒壁出现缝隙时,螺钉通过金属弹簧依然保持与筒壁的金属连接,保证了电压和电场的分布均匀。现场安装金属小弹簧如图8所示。



图8 绝缘子支撑螺钉末端金属弹簧安装图

带有弹簧的支撑螺钉安装完成后的现场图见图9。由图可见,由于重力作用,最上端螺钉与筒壁出现了明显间隙。图中圆圈中的金属弹簧张开,保证了螺钉与外壳的金属连接。

为验证安装弹簧后 GIL 内电场和电压的分布情况,将弹簧加入所建立的有限元模型,对支撑螺钉与外壳存在缝隙的工况进行仿真,结果如图10、图11。

由图10、图11可见,模型中以圆圈中的细小矩形单元作为支撑螺钉末端的弹簧,弹簧为螺钉与外壳之间建立了电气连接。对比图6与图7可见,加入弹簧后,GIL 通管内的电场分布及电压分布重新恢复了均匀。缝隙间的畸变电场消失,螺钉电位变为零电位,同时螺钉与绝缘子交接部分的电压也随之下降。



图9 支撑螺钉末端弹簧位置图

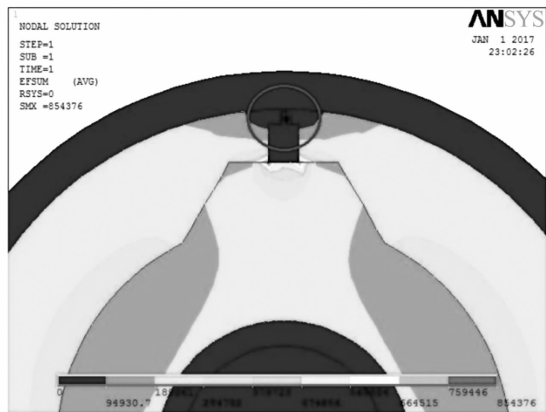


图10 安装弹簧后缝隙处电场分布

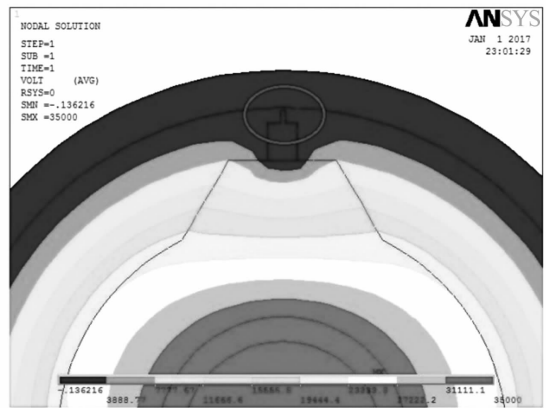


图11 安装弹簧后缝隙处电压分布

理论仿真结果表明,所提出的支撑螺钉末端加装弹簧的改进方法能够使通管内电场分布更加均匀,有效解决绝缘子端部局部放电问题。同时,所提方法仅需在原有绝缘子支撑螺钉的末端钻一个小孔用以安放弹簧,并不需要换装新的绝缘子。而弹簧本身只需采用普通不锈钢材质,并无特殊要求。因此所提的改进方法具有明显的施工简便、成本低的优点。

(下转第73页)

一起电抗器差动保护误动事故的分析和对策

包顺先¹, 韩安兵², 李 辉²

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211111; 2. 国网泸州供电公司, 四川 泸州 646000)

摘要:分析了一起在变压器低压侧投入并联电抗器时电抗器差动保护的動作行为, 指出 CT 暂态饱和是引起差动保护误动的根本原因。电抗器差动保护采用比率制动特性和二次谐波闭锁, 在一定程度上可以防止 CT 饱和所引起的误动, 当电抗器相电流比较小、制动电流比较小时, 比率制动特性不能起到应有的作用。此外, CT 饱和后, 差流中二次谐波含量很低, 导致二次谐波闭锁失效。提出了一种利用差动电流的直流分量和基波分量的比值来修正差动电流的方法, 该方法可以有效地防止 CT 暂态饱和所引起的差动保护误动。理论和实践表明, 采用该方法后该电抗器再未发生投入电抗器的误动事故。

关键词:电抗器; 差动保护; 暂态饱和; 误动

中图分类号: TM772 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2018)01-0053-03

Analysis on Mal – operation of Reactor Differential Protection and Its Strategy

Bao Shunxian¹, Han Anbing², Li Hui²

(1. NR Electric Co., Ltd, Nanjing 211111, Jiangsu, China;

2. State Grid Luzhou Electric Power Supply Company, Luzhou 646000, Sichuan, China)

Abstract: The behavior of reactor differential protection is analyzed when switching on shunt reactor at the low voltage side of transformer, and it is pointed out that CT transient saturation is the root cause of triggering mal – operation. Applying ratio – brake characteristic and second harmonic blocking can avoid mal – operation to a large extend, however, in the case of small phase current and small brake current, the ratio – brake characteristic cannot play its due function. Furthermore, after CT saturation, second harmonic in differential current is very low, which will cause second – harmonic blocking invalid. A new algorithm is presented to avoid mal – operation caused by CT transient saturation. This algorithm makes use of the ratio of DC and fundamental component to get a correction factor, and then get a corrected differential current. Theory and practice show that there is not any mal – operation of shunt reactor differential relaying since this new algorithm is applied.

Key words: shunt reactor; differential protection; transient saturation; mal – operation

0 引 言

高压电抗器安装在超高压变电所的开关站里, 吸收超高压架空线路的容性充电功率, 可以起到降低工频暂态过电压和限制操作过电压的作用, 能提高系统稳定性, 减少线路中传输的无功, 提高输电效率; 还能降低工频稳态电压利于系统同期, 有利于消除同步电机带空载长线路可能出现的自励磁现象。低压电抗器通常分组装设于超高压变电所主变压器

的低压侧, 作用是维持无功平衡。当高压电抗器装设容量不足或装设高压电抗器有困难时, 装设低压电抗器可以起补足作用, 按无功平衡的需要进行分组投切, 运行灵活, 投入低压电抗器还可以抑制轻负荷时母线电压升高。

GB/T 14285-2006《继电保护和安全自动装置技术规程》规定: 对油浸式并联电抗器内部及其引出线的相间和单相接地短路, 纵联差动保护应瞬时动作于跳闸。对于纵联差动保护而言, 其关键问题是防止 CT 暂态饱和所引起纵联差动保护误动, 目前在工程上常用的方法是采用比率制动特性和二次

谐波闭锁。即便如此,仍时常发生因 CT 饱和而引起的误动事故,需要引起继电保护工作者的关注。下面主要讨论低压电抗器 CT 饱和所引起的差动保护误动问题。

1 分 析

某 500 kV 变电站在变压器低压侧投入并联电抗器时,电抗器差动保护误动跳闸。该电抗器保护采用两折线比率制动特性,差动电流定值为 1.0 A,拐点电流为 4.0 A,比率制动斜率为 0.5。二次谐波闭锁定值为 15%。差动电流 $I_{cd} = |I_1 + I_2|$,制动电流 $I_{zd} = |I_1 - I_2|/2$,其中 I_1 为电抗器第 1 侧电流, I_2 为电抗器第 2 侧电流, I_1 和 I_2 均以指向电抗器为正方向。

图 1 和图 2 分别是电抗器保护装置所记录的电抗器两侧电流波形。可以看出,在投入电抗器后,三相电流含有明显的直流分量成分,第 1 侧电流波形比较正常,但第 2 侧 A 相和 C 相电流波形在 150 ms 开始直流分量迅速衰减,呈现出明显的 CT 暂态饱和的特征。经计算差动电流波形如图 3 所示。

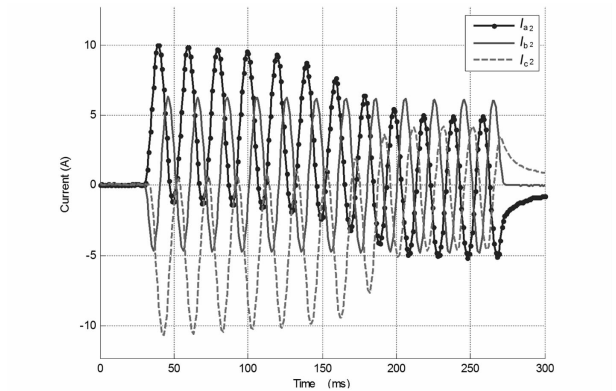


图 1 电抗器第 1 侧三相电流

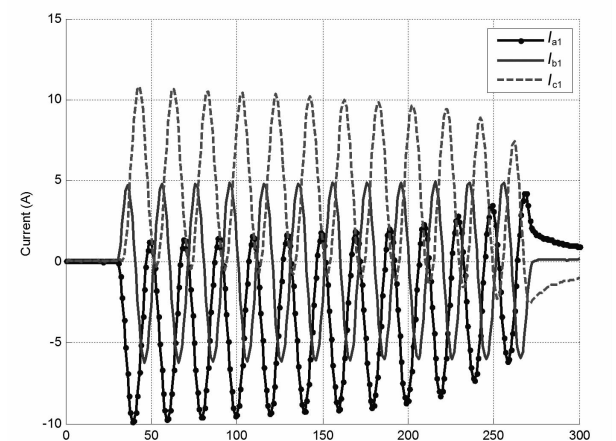


图 2 电抗器第 2 侧三相电流

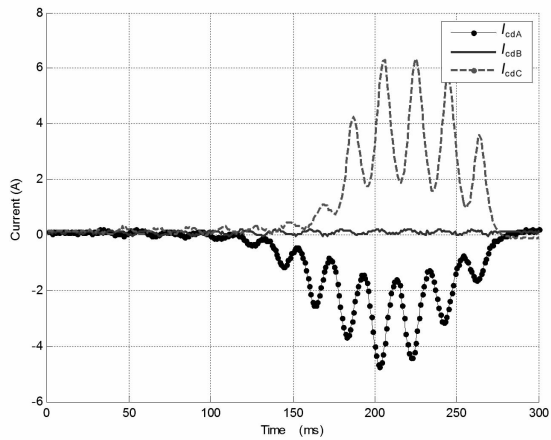


图 3 电抗器三相差流波形

差动保护在 215 ms 判定 A 相和 C 相差动动作,并发出跳闸命令,在 200 ms 至 250 ms 期间,差动电流和制动电流的比率制动轨迹如图 4 所示,差动电流二次谐波含量如图 5 所示。在此时间范围内,差动电流二次谐波含量均小于 15%,在 215 ms 时刻 A 相二次谐波含量为 6.5%,C 相二次谐波含量为 11%,二次谐波未能闭锁差动保护。

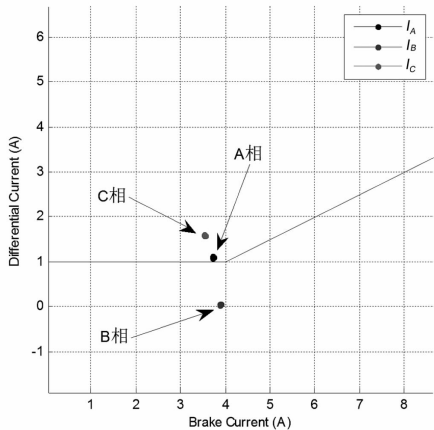


图 4 三相差动电流比率制动轨迹

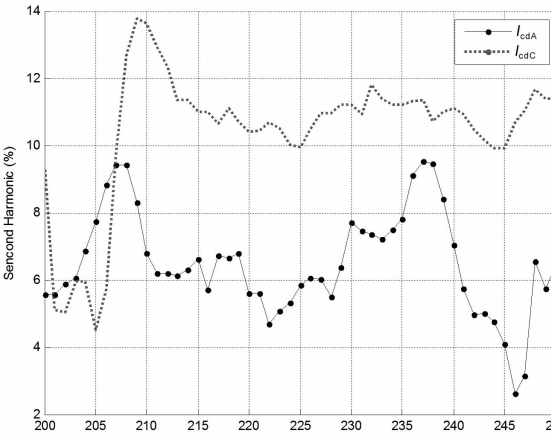


图 5 A 相和 C 相差动电流二次谐波含量

2 对 策

避免 CT 饱和可能引起的保护误动一直是困扰差动保护可靠性的主要问题。本次事故表明采用比率制动特性和二次谐波闭锁仍难以有效地避免 CT 饱和引起的差动保护误动作,特别是在较小的制动电流情况下的 CT 饱和问题需要在保护算法上采取额外的补救措施。

从图 3 可以看出:在 CT 逐渐饱和的过程中,差动电流逐渐增大,且差动电流波形偏向时间轴的一侧,A 相和 C 相差流均符合这个特征。因此,提出如下补充判据:

$$\begin{cases} R = 1 + \left| \frac{I_{cd0}}{\sqrt{2}I_{cd1}} \right| (I_{zd} < 1.5I_{gd}) \\ R = 1 (I_{zd} \geq 1.5I_{gd}) \\ I'_{cd} = \frac{I_{cd}}{R} \end{cases} \quad (1)$$

式中: R 为差动电流修正系数; I_{cd1} 为差动电流的基波分量幅值; I_{cd0} 为差动电流的直流分量幅值; I_{zd} 为制动电流基波幅值; I_{gd} 为拐点电流定值; I'_{cd} 为修正后的差动电流,并以此进行差动保护判定。

所提判据在制动电流较大($I_{zd} \geq 1.5I_{gd}$)的情况下取 $R = 1$,与常规差动保护判据相同。在制动电流较小情况下($I_{zd} < 1.5I_{gd}$)对差动电流进行修正,直流分量越大, R 值越大, I'_{cd} 修正后的差动电流越小,避免差动保护误动作。采用该判据后,重新计算的本次误动事故比率制动轨迹如图 6 所示,修正后的差动电流变小,使得比率制动轨迹位于制动曲线下,差动保护不会误动作。

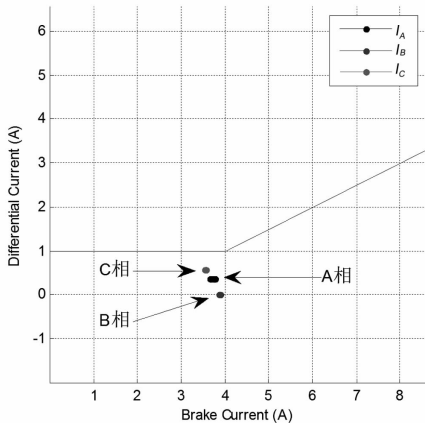


图 6 改进后的三相电流比率制动轨迹

根据上述算法,对电抗器差动保护装置进行了

改进,改进后再未发生电抗器差动保护的误动事故。

传统的比率制动特性很难避免电流幅值较小情况下的 CT 饱和引起的误动,特别是在差动电流门槛定值较小的情况下。较小的差动电流门槛定值虽然可以提高差动保护的灵敏度,但也降低了差动保护的安全性,容易引起保护误动作,在进行整定计算的时候需要综合考量。

由于一次系统运行和故障情形的多样性,单纯依靠保护装置自身的 CT 饱和闭锁判据以及比率制动特性本身对 CT 饱和的抵抗力很难适应所有情形下的 CT 饱和。对于传统的电磁式电流互感器,差动保护应尽量选取相同型号的 CT 以减少不平衡电流及 CT 饱和的影响。新型的电子式互感器不存在 CT 饱和问题,采用新型的电子式互感器才是彻底解决 CT 饱和问题的根本办法。

3 结 语

目前,工程上普遍依靠比率制动特性和二次谐波闭锁来避免差动保护的 CT 饱和误动,该方法在电流幅值较小且发生 CT 饱和情况下,容易发生误动。通过一起电抗器差动保护误动事故的详细分析,指出小电流情况下 CT 暂态饱和是引起差动保护误动的根本原因,并提出了一种改进的差动保护算法,该算法利用差动电流中的直流分量与基波分量的幅值来确定修正系数,进而得到修正后的差动电流。理论和实践表明,使用该方法可以避免差动保护误动事故。此外,建议适当提高差动保护的差动电流门槛定值;采用电子式互感器,才能在根本上彻底解决 CT 饱和引起的差动保护误动问题。

参考文献

[1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社,2002.

[2] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京:中国电力出版社,1999.

[3] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第三版)[M]. 北京:中国电力出版社,2005.

作者简介:

包顺先(1978),工程师、硕士,研究方向为电力系统无功功率补偿控制保护及柔性交流输电系统(FACTS);
韩安兵(1977),高级工程师、工程硕士,研究方向为电网调度运行管理。
(收稿日期:2017-09-22)

主变压器断路器失灵保护回路与时延定值关系分析

郭晓鸣

(国网四川省电力公司天府新区供电公司, 四川 成都 610041)

摘要:变电站主变压器断路器失灵保护, 由于其保护配置、二次回路接线方式的不同存在较大差异; 现场检修人员和保护定值整定人员存在理解不到位的情况。从多种保护配置的方案出发, 对比分析主变压器断路器失灵保护实现的方式和特点, 并详细探讨其中与失灵保护有关的延时定值整定问题。旨在理清主变压器中压侧断路器失灵回路的特点, 指导继电保护定值整定人员的工作。

关键词:主变压器保护; 母线保护; 失灵保护; 整定延时

中图分类号: TM77 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2018)01-0056-05

Analysis on Relationship between Circuit – breaker Failure Protection Loop of Main Transformer and Delay Time Settings

Guo Xiaoming

(State Grid Tianfu New Area Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: There is a big difference in the circuit – breaker failure protection of main transformer in different substations due to the differences of protection configuration and connection mode of secondary circuit. Maintenance personnel in the field and protection value setting operators cannot understand the differences very well. The realization methods and characteristics of circuit – breaker failure protection of main transformer are analyzed and compared based on the variety of protection configuration schemes, and the setting delay of failure protection are discussed in detail, which can straighten the characteristics of failure protection loop and guide the setting work of relay protection.

Key words: main transformer protection; busbar protection; failure protection; setting delay

0 引言

当系统发生故障时,故障元件的保护动作但其断路器操作机构失灵拒绝跳闸时,通过故障元件的保护,作用于同一变电站相邻元件的断路器使之跳闸的保护方式,就称为断路器失灵保护^[1]。失灵保护的逻辑一般包含三个要素,即保护跳闸开入、断路器电流、失灵延时定值,从而构成完整的失灵保护逻辑。这三个要素必须同时满足并且符合现场实际的二次回路接线方式,方可保证失灵保护的正确动作。下面主要研究主变压器断路器失灵保护的回路构成与失灵延时定值之间的关系。

1 失灵保护回路与时延定值关系分析

针对主变压器高压侧或中压侧为 220 kV 双母线接线方式的主变压器断路器失灵保护回路进行研究,探讨其与保护装置相关失灵延时定值的关系。以 500 kV 变电站为例,其 500kV 系统采用 3/2 接线方式,220 kV 系统多采用双母线接线方式,主变压器三侧接线示意图如图 1 所示。

1.1 非六统一变压器保护和母线保护配合判别失灵

变压器保护配置有独立的电量保护和非电量保护,其中变压器非电量及辅助保护装置可实现主变压器中压侧断路器的失灵判别及失灵联跳主变压器三侧断路器功能,如 RCS-974FG。变压器配置的电量

保护本身不具备联跳主变压器三侧断路器的功能。

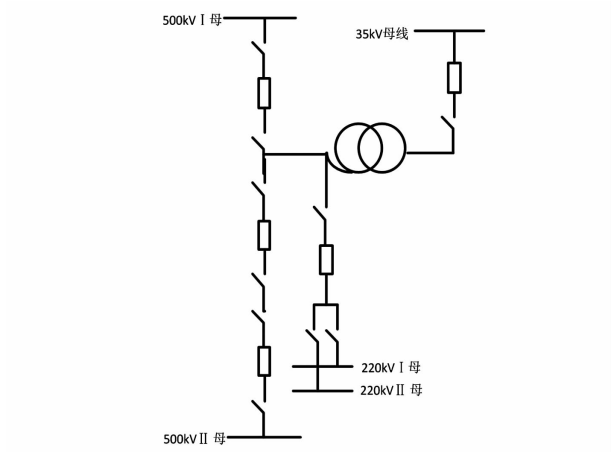


图1 主变压器三侧接线

RCS-974FG 与失灵延时相关的可整定定值见表1^[2]。

表1 RCS-974FG 失灵延时相关定值

定值名称	定值范围
失灵时限 T_1	0 ~ 10 s
失灵联跳时限 T_2	0 ~ 10 s

220 kV 母线保护配置分两种情况：一种情况，母线保护专门为主变压器支路提供了联跳主变压器其他各侧断路器的功能。主变压器断路器失灵由母线保护装置判断后，经一定延时出口联跳主变压器其他侧断路器，如 RCS-915GC。另一种情况，母线保护不区分主变压器和线路支路，母线保护动作提供失灵启动接点，由其他装置完成失灵判别联跳主变压器其他侧断路器，如 RCS-915AS。

RCS-915GC、RCS-915AS 与失灵延时相关的可整定定值见表2^[3]、表3^[4]。

表2 RCS-915GC 失灵延时相关定值

定值名称	定值范围
失灵保护1 时限 t_1	0 ~ 10 s
失灵保护2 时限 t_2	0 ~ 10 s

根据现场保护实际配置情况，分析保护装置之间的配合关系，明确失灵保护的回路及失灵延时定值的关系。

表3 RCS-915AS 失灵延时相关定值

定值名称	定值范围
跟跳动作时间 T_{gt}	0.01 ~ 10 s
母联动作时间 T_{ml}	0.01 ~ 10 s
失灵保护动作时间 T_{sl}	0.01 ~ 10 s

1.1.1 RCS-974FG 与 RCS-915GC 配合

1) 母线保护动作跳主变压器中压侧断路器失灵

220 kV 母线发生故障，母差保护动作跳开故障母线连接的所有断路器，若此时故障母线连接的主变压器中压侧断路器失灵，则断路器失灵保护应跳开主变压器三侧断路器，隔离故障点。

现场二次回路的实现方式为：RCS-915GC 母线保护动作，启动内部的失灵判断逻辑，并通过母线保护采集的主变压器中压侧断路器电流判据经“失灵保护2 时限 t_2 ”（可整定）延时，通过联跳回路开给 RCS-974FG 装置的失灵联跳开入；RCS-974FG 收到失灵联跳开入后，再次进入失灵启动逻辑，通过其采集的主变压器中压侧断路器的电流判断后经“失灵联跳时限 T_2 ”（可整定）延时，失灵接点 SLQD2 闭合开给 RCS-974 非电量开入，通过非电量跳闸回路延时 50 ms 出口跳主变压器三侧断路器。

可将上述过程简化为图2。

由图2 分析可知，若母线保护动作跳主变压器中压侧断路器失灵时，断路器失灵的判断逻辑在 RCS-915GC 与 RCS-974FG 装置均作判断。从故障发生到 RCS-974FG 装置联跳主变压器三侧断路器隔离故障的时间由四部分组成，如图3 所示。

母线保护动作跳主变压器中压侧断路器失灵，联跳主变压器三侧断路器时间应可靠躲过主变压器中压侧断路器正常跳开时间 T_n （母线保护动作出口 10 ms + 机构动作 40 ms + 裕度 100 ms = 155 ms）。因此针对类似情况，可得出如下结论：

$$t_2 + T_2 + 60 > T_n \tag{1}$$

式中： t_2 为 RCS-915GC 的可整定失灵保护2 时限；

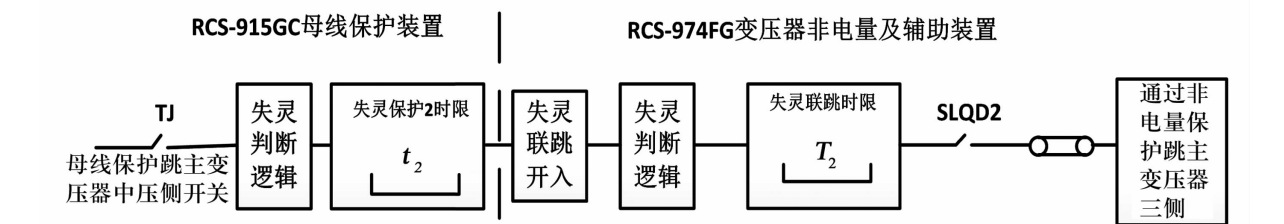


图2 母线保护动作启动主变压器中压侧断路器失灵跳主变压器三侧回路

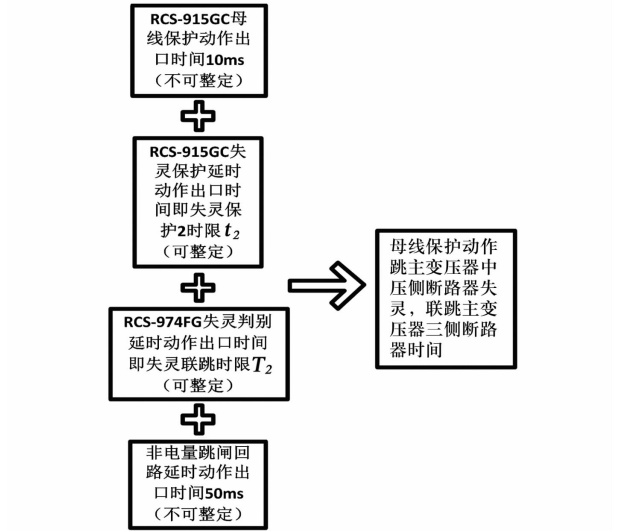


图 3 母线保护动作跳主变压器中压侧断路器失灵，联跳主变压器三侧断路器时间构成

T_2 为 RCS - 974FG 的失灵联跳时限； T_n 为主变压器中压侧断路器正常跳开时间。

2) 主变压器保护动作跳主变压器中压侧断路器失灵

主变压器保护动作跳主变压器中压侧断路器，若断路器失灵时，既需联跳主变压器三侧断路器，同时需跳开主变压器中压侧断路器所连接母线上的其他断路器。

现场联跳主变压器三侧断路器二次回路为：当主变压器电量保护动作跳主变压器中压侧断路器时，主变压器电量保护开给母线保护主变压器三相失灵和解除复压闭锁开入，启动母线保护的失灵判别逻辑；母线保护根据所采集主变压器中压侧断路器电流进行判别后，经“失灵保护 1 时限 t_1 ”（可整定）跳母联，经“失灵保护 2 时限 t_2 （可整定）延时，通过联跳回路开给 RCS - 974FG 装置的失灵联跳开入；RCS - 974FG 收到失灵联跳开入后，再次进入失灵启动逻辑，通过其采集的主变压器中压侧断路器

的电流判断后，时经“失灵联跳时限 T_2 ”（可整定）延时，失灵接点 SLQD2 闭合开给 RCS - 974 非电量开入，通过非电量跳闸回路延时 50 ms 出口跳主变压器三侧断路器。

可将上述过程简化为图 4。

由图 4 分析可知，当主变压器中后备保护动作跳主变压器中压侧断路器失灵时，断路器失灵的判断逻辑在 RCS - 915GC 和 RCS - 974FG 内均作判断。从故障发生到母线保护跳开连接母线上所有断路器的时间由两部分组成，而从故障发生到 RCS - 974FG 装置联跳主变压器三侧的时间由 4 部分组成，如图 5 所示。

主变压器电量保护动作跳主变压器中压侧断路器失灵，跳同一母线相邻断路器和联跳主变压器三侧断路器时间需可靠躲过主变压器中压侧断路器正常跳开时间 T_n 。因此针对类似情况，可得出如下结论：

$$\begin{aligned} t_2 + 10 &> T_n \\ t_2 = T_2 + 60 &> T_n \end{aligned} \tag{2}$$

3) 结论

结合式(1)和式(2)所得结论及继电保护整定计算技术规范^[5]，建议将 RCS - 915GC 的失灵保护 2 时限 t_2 整定为 0.3 s，RCS - 974 的失灵联跳时限 T_2 整定为 0.01 s。若 RCS - 915GC 的失灵保护 2 时限 t_2 整定过短，无法躲过断路器正常跳开时间可能导致误动，扩大事故范围。若 RCS - 974 的失灵联跳时限 T_2 整定时间过长，可能造成失灵保护无法及时动作，影响系统的稳定运行。

1.1.2 RCS - 974FG 与 RCS - 915AS 配合

1) 母线保护动作跳主变压器中压侧断路器失灵

现场二次回路的实现方式为：RCS - 915AS 母线保护动作，启动主变压器中压侧断路器失灵接点 TJ 经 10 ms 延时闭合，通过失灵启动回路将中压侧断路器失灵开入给 RCS - 974FG 装置的失灵联跳开

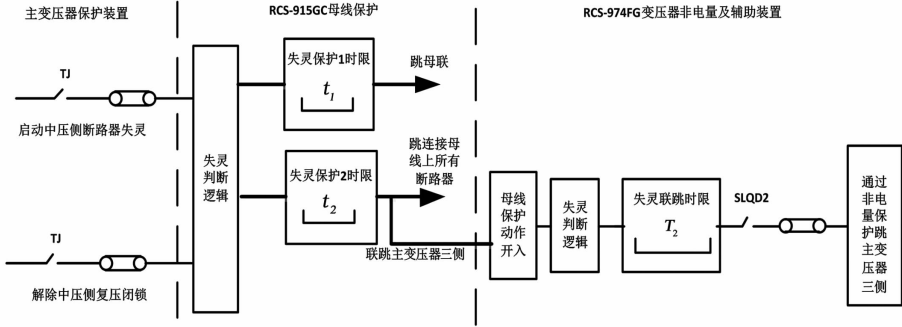


图 4 主变压器保护动作跳中压侧断路器并启动失灵跳相邻开关

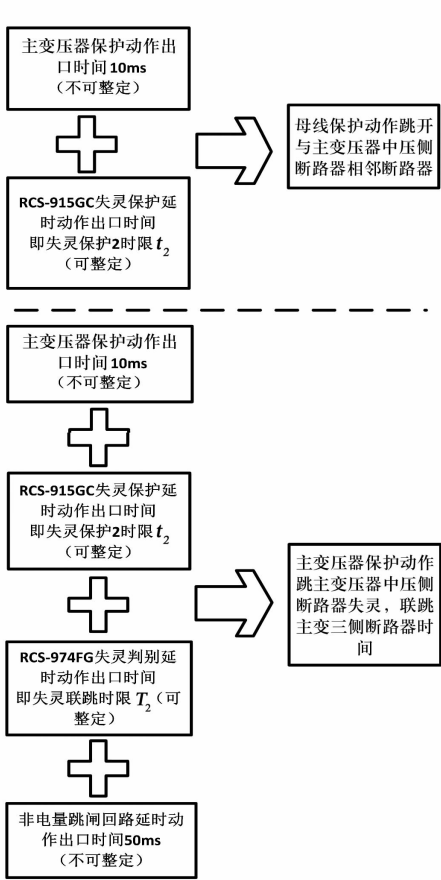


图 5 主变压器保护动作跳主变压器中压侧
断路器失灵,联跳同一母线相邻断路器及主变压器
三侧断路器时间构成

入;RCS-974FG 收到失灵联跳开入后,进入失灵启动逻辑,通过其采集的主变压器中压侧断路器的电
流判断经“失灵联跳时限 T_2 ”(可整定),失灵接点
SLQD2 闭合开给 RCS-974 非电量开入,通过非电量
跳闸回路延时 50 ms 出口跳主变压器三侧断路器。

可将上述过程简化为图 6。

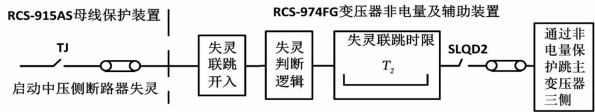


图 6 母线保护动作启动主变压器中压侧
断路器失灵跳主变压器三侧回路

由图 6 分析可知,若母线保护动作跳主变压器
中压侧断路器失灵时,断路器失灵的判断逻辑在
RCS-974FG 装置内完成。从故障发生到 RCS-
974FG 装置联跳主变压器三侧断路器的时间由 3 部
分组成,如图 7 所示。

母线保护动作跳主变压器中压侧断路器失灵,
联跳主变压器三侧断路器时间需可靠躲过主变压器
中压侧断路器正常跳开时间 T_n 。因此针对类似情

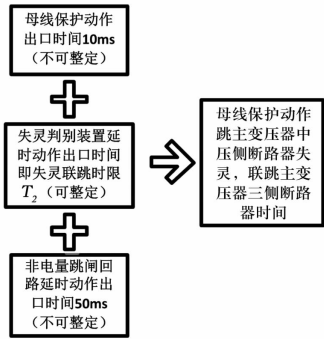


图 7 母线保护动作跳主变压器中压侧断路器失灵,
联跳主变压器三侧断路器时间构成
况,可得出如下结论:

$$T_2 + 60 > T_n \tag{3}$$

2)主变压器保护动作跳主变压器中压侧断路
器失灵

现场联跳主变压器三侧断路器二次回路为:当
主变压器电量保护动作跳主变压器中压侧断路器
时,主变压器电量保护开给 RCS-974FG“变压器保
护跳闸起动失灵”;RCS-974FG 收到开入后,进入
失灵启动逻辑,通过其采集的主变压器中压侧断路
器的电流判断经“失灵联跳时限 T_2 ”(可整定),失
灵接点 SLQD1 闭合开给 RCS-974 非电量开入,通
过非电量跳闸回路延时 50 ms 出口跳主变压器三
侧断路器。

现场跳主变压器中压侧断路器所连接母线上的
其他断路器二次回路为:当主变压器电量保护动
作跳中压侧断路器时,主变压器电量保护开给母
线保护解除复压闭锁开入,同时开给 RCS-974FG
“变压器保护跳闸起动失灵”;此时 RCS-974FG 收
到失灵联跳开入后,进入失灵启动逻辑,由本装置
所采集到的主变压器中压侧断路器电流判断经“失
灵时限 T_1 ”(可整定),将失灵开给 220 kV 母线保
护;当母线保护的失灵保护检测到此开入时,根据
其采集到的主变压器中压侧断路器电流判断,经
过失灵保护电压闭锁起动失灵保护;失灵保护经
跟跳延时 T_{gt} (可整定)再次动作于该线路断路器,
经跳母联延时 T_{ml} (可整定)动作于母联,经失灵
保护动作延时 T_{sl} (可整定)切除该元件所在母
线的各个连接元件。

可将上述过程简化为图 8。

由图 8 分析可知,当主变压器中后备保护动
作跳主变中压侧断路器失灵时,断路器失灵的判
断逻辑在 RCS-974FG 和 RCS-915AS 内均做判
断。从故障发生到母线保护跳开连接母线上所有
断路器的时间和到 RCS-974FG 装置联跳主变
压器三

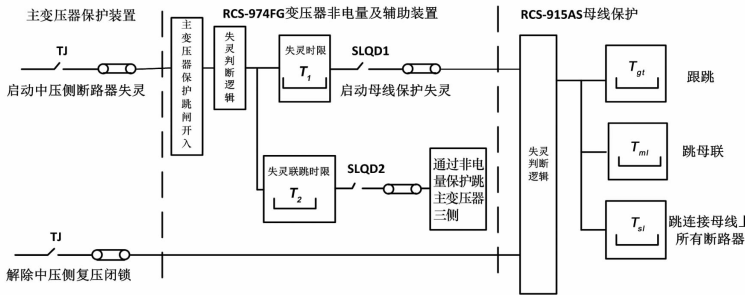


图 8 主变压器保护动作跳中压侧断路器并启动失灵跳相邻开关

侧的时间均由 3 部分组成,如图 9 所示。

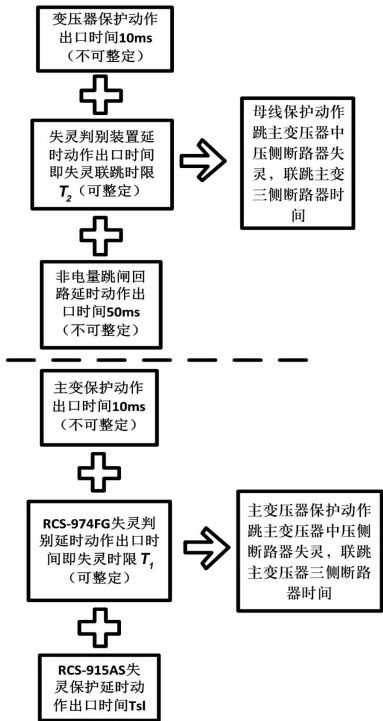


图 9 主变压器保护动作跳主变压器中压侧断路器失灵,联跳同一母线相邻断路器及主变压器三侧断路器时间构成

主变压器电量保护动作跳主变压器中压侧断路器失灵,跳同一母线相邻断路器和联跳主变压器三侧断路器时间需可靠躲过主变压器中压侧断路器正常跳开时间 T_n 。因此针对类似情况,可得出如下结论:

$$T_2 + 60 > T_n$$

$$T_1 + T_{s1} + 10 > T_n \quad (4)$$

式中: T_1 为 RCS - 974FG 的失灵时限; T_{s1} 为 RCS - 915AS 的失灵保护动作时间。

3) 结论

结合式(3)和式(4)所得结论及继电保护整定计算技术规范^[5],建议将 RCS - 974 的失灵时限 T_1 整定为 0.01 s,失灵联跳时限 T_2 整定为 0.3 s。若失灵联跳时限整定过短可能造成保护误动而扩大事故范围。由于 RCS - 915AS 母线保护的失灵保护动作时间 T_{s1} 为母线保护装置失灵保护的公共定值,需兼顾连接母线的所有间隔,一般整定为 0.3 s。

1.2 六统一主变压器保护和母线保护配合

按照国家电网公司六统一的要求,母线保护具备区分主变压器支路和线路支路功能,可判失灵并启动主变压器联跳。

主变压器中压侧断路器失灵由母线保护来判断,有两种情况可以启动母线保护判主变压器中压侧开关失灵:一是母差保护动作;二是主变压器电量保护动作,开给母差保护启动失灵和解除复压闭锁。变压器支路失灵保护动作,经失灵短延时跳开母联开关,长延时跳开相应母线,同时启动变压器支路跳三侧功能。其逻辑框图如图 10 所示。

母线保护专门提供变压器失灵跳三侧启动接点,直接开给变压器保护中压侧失灵联跳开入,由变压器保护完成跳主变压器三侧断路器功能。变压器中压侧断路器失灵保护动作开入后,应经灵敏的、不

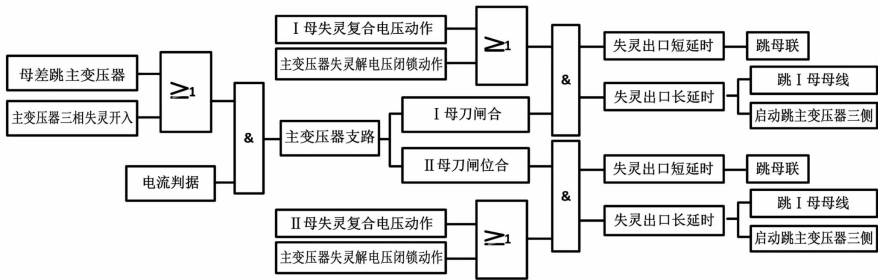


图 10 六统一母线保护断路器失灵保护逻辑图

(下转第 66 页)

硬件在环实时仿真系统延迟 对滞环电流控制仿真影响研究

周宏林, 吴小田, 代同振

(中国东方电气集团有限公司中央研究院, 四川 成都 611731)

摘要:硬件在环实时仿真系统如 RT-LAB、RTDS 等近年在电力电子研究领域中得到了广泛的应用。在使用硬件在环仿真的过程中, 研发人员往往关注仿真机的最小步长而忽视仿真机输入到输出的延迟指标。针对采用滞环电流控制的并网逆变器, 研究了硬件在环实时仿真中输入到输出延迟指标的重要性。通过理论研究、仿真和实验得出在滞环电流控制的硬件在环仿真中, 仿真机的输入到输出延迟对滞环电流控制有明显的负面影响, 它会导致滞环比较带宽增加, 进而降低滞环比较控制的开关频率, 让并网逆变器的电流谐波增大, 使得硬件在环仿真下的控制器性能劣于真实系统。即使仿真机保持较小的仿真步长, 也无法真实有效地模拟出真实的滞环电流控制系统的性能。随着开关频率的提高, 一味地通过提高仿真机性能来解决硬件在环仿真准确度问题的思路并不可取, 未来需要考虑其他技术手段来缓解该问题。

关键词:硬件在环; 实时仿真; 延迟; 滞环电流控制; 并网逆变器

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2018)01-0061-06

Study on Effect of Hardware – in – the – Loop Real – time Simulation Delay on Hysteresis Current Control for Grid – connected Converter

Zhou Honglin, Wu Xiaotian, Dai Tongzhen

(Central Research Academy of DongFang Electric Corporation, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: In recent years, hardware – in – the loop (HIL) simulation such as RT-LAB and RTDS are widely used in the research of power electronic system. In order to keep the simulation accuracy, the main concern of researchers normally focuses on the minimum simulation step size of the simulator, while neglects the role of input – to – output delay of the simulator. Aiming at the grid – connected converter with hysteresis current control, the importance of simulator delay is studied. Through theoretical analysis, simulation and experiments, it is found out that the delay of the simulator seriously affects the control performance: it can apparently increase the hysteresis current band, reduce the switching frequency, increase the current THD (total harmonic distortion) and therefore deteriorate the control. With the input – out – delay, even if the simulation step is kept small, the simulation results are neither accurate nor trustable. With the increasing of switching frequency nowadays, other technical means should be adopted to alleviate the effect of delay rather than purely reducing the simulation step.

Key words: hardware – in – the loop (HIL) simulation; real – time simulation; delay; hysteresis current control; grid – connected converter

0 引 言

半实物实时仿真系统如 RT-LAB、RTDS 等近年在电力电子研究领域中得到了广泛的应用^[1-2]。而半实物实时仿真常又分为快速控制器原型(rapid control prototyping, RCP)和硬件在环(hardware in

loop, HIL)两种。二者区别在于,快速控制器原型是用仿真机作为控制器来控制真实的物理对象,而硬件在环则是用仿真机模拟被控对象,用真实的控制器来控制,如图 1 所示。在电力电子系统的研发过程中,往往是控制器易搭建,而被控对象主电路不易搭建,因此经常采用的是硬件在环的仿真方式。

随着电力电子器件技术进步,现代电力电子较

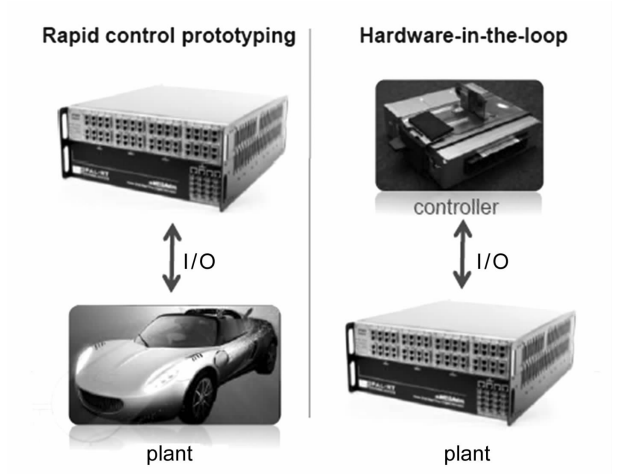


图 1 半实物仿真的两种主要形式

多采用有较高速度的可关断开关器件,如 MOSFET、IGBT、IGCT 等等。由于被控对象开关频率较高,因此为了准确模拟其开关暂态过程中各电参量的变化,就要求仿真机具有非常快的响应能力,即要求仿真机具有非常高的实时性。例如,对于 1 kHz 的开关信号,开关周期即为 1 ms,并且开关跳变在这 1 ms 中间的任何一个时刻都可能发生。要比较准确地模拟开关周期内的电量(如电流)变化,比如分辨率做到 100 点,那么仿真步长就要降低到 10 μs。这意味着,仿真机必须要在 10 μs 之内完成一次被控对象的模拟。可以说,50 μs 以下的步长仿真是电力电子硬件在环仿真研究中经常遇到的情形。

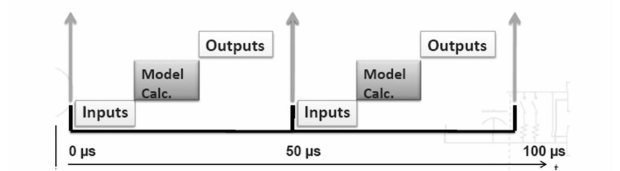


图 2 仿真机运行时序

仿真机无论采用 CPU 还是 FPGA 的架构形式,本质上是一台高性能的计算机,它运行在实时操作系统下,实现输入采样、迭代计算和外部输出,如图 2 所示。要准确模拟被控对象,仿真机除了要有快速的周期迭代计算能力,即具有很小的仿真步长外,还要具有尽可能短的输入到输出的延迟。输入到输出延迟也是半实物仿真区别于纯离线仿真和真实系统的一个独特之处,而这常常被实时仿真机用户忽略。

对于并网逆变器应用来说,滞环电流控制^[3-7]是除了矢量控制之外的一种非常经典的控制方式。尽管滞环控制存在开关频率不固定、谐波分布广的问题,但其优点也很突出,例如它具有非常快的动态

响应、控制精度高、易于设计和调试等。此外,近年在多电平逆变器研究中,滞环电流控制也受到关注^[8-11]。

下面将考查采用硬件在环实时仿真系统来仿真基于滞环电流控制的并网逆变器时的特殊问题:研究硬件在环实时仿真系统延迟对控制仿真影响,通过理论分析输入输出延迟带来的仿真误差;通过实例对比纯离线仿真和半实物仿真的结果,验证理论分析。通过实际案例研究指出,在一些特殊的场合下,即使在仿真步长很小的情况下,仿真机的输入输出延迟也会带来较大的仿真误差,甚至错误的仿真结果。

1 变流器滞环电流控制硬件在环仿真系统

网侧变流器是直驱风力发电系统中的重要部件之一,主要实现对直流母线电压和并网功率的控制,其中对并网电流的控制是实现电压和功率控制的基础。如图 3 所示,网侧变流器采用单电感并网,电流环控制器采集三相电感电流 i_{abc} ,跟相应的给定电流 i_{abc_ref} 做差,再经过电流滞环生成控制三相桥臂的 PWM 信号。

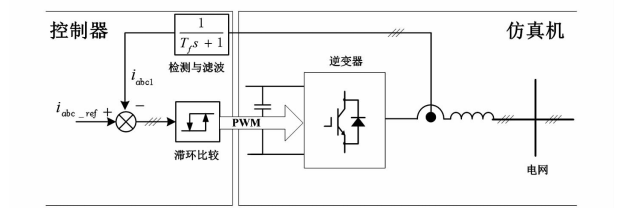


图 3 变流器滞环电流控制硬件在环仿真系统

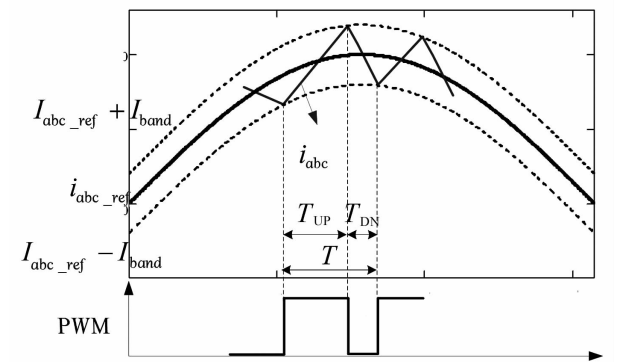


图 4 电流滞环控制原理图

电流滞环控制的原理如图 4 所示,当受控的并网电感电流 i_{abc} 上升至给定电流和迟滞电流之和 $i_{abc_ref} + I_{band}$ 时,对应桥臂的上管关断,下管开通,电

感电流 i_{abc} 将开始下降, 当下降至 $i_{abc_ref} - I_{band}$ 时, 上管开通而下管关断。图中 T_{UP} 对应上管开通时间, T_{DN} 对应下管的开通时间。很容易看出, 通过调节迟滞电流 I_{band} 的大小就可以调节开关频率和被控电流 i_{abc} 的总谐波失真 (total harmonic distortion, THD)。迟滞电流越小, 开关频率越高, 被控电流波形将越接近给定电流, THD 将越小。

2 输入到输出延迟的来源分析

硬件控制系统与仿真机之间的闭环系统中, 存在多种延迟。这些延迟的来源可以归纳为两类: 一类是控制系统自身的延迟; 另一类是仿真机的延迟。在滞环电流控制中, 控制系统采用的是模拟电路, 而仿真机采用的是数字处理器, 因而二者延迟的来源存在明显的不同。

2.1 控制系统的延迟

控制系统自身的典型延迟包括:

1) 信号滤波延迟。即真实模拟信号被控制系统中的信号调制电路滤波导致的延迟。这里具体为电流在控制板上滤波导致的延迟。

2) 滞环比较 PWM 输出传输带来的延迟。即 PWM 信号发出到变换为仿真机接受的门极信号之间, 因逻辑门电路及滤波环节产生的延迟。

滞环控制系统的延迟是固有的延迟, 无论被控对象是仿真机还是真实逆变器, 这部分延迟都是存在的, 因此不是这里讨论的重点。

2.2 仿真机的延迟

仿真机本质上是一套数字系统, 由“PWM 输入 - 数字化处理器计算 - 模拟量输出”环节组成, 因此它的典型延迟包括:

- 1) PWM 输入预处理带来的延迟。即输入 PWM 经过周期平均化和边沿检测后形成数字量的过程所带来的延迟。
- 2) 数字通信带来的延迟。即经预处理后的 PWM 数字信号 (一般是周期平均值和边沿时间戳) 进入处理器计算前, 以及处理器计算完成后到 PWM 调制前, 因板上或板间通信 (通常板间通信更为明显) 导致的延迟。
- 3) 处理器计算周期带来的延迟。即因处理器控制循环周期计算导致的一拍或多拍延迟。本质上是离散化系统所固有的延迟。

4) D/A 转换输出带来的延迟。本质上 D/A 是一种零阶保持器, 它具有固有的延迟特性。

处理器计算周期延迟取决于处理器的速度、所用实时操作系统的类型以及任务量, 目前市场上的实时仿真器产品将其控制到一个仿真步长之内已没有太大的难度, 但仿真步长越大延迟越大。

输入到输出延迟的关键主要在于信号进入处理器前和出处理器后的阶段, 包括板间通信、PWM 输入处理和 D/A 输出处理。一般仿真机出于易扩展考虑, 采用与处理器相独立的输入/输出卡的架构, 这决定了板间通信的必然性。必须采用非常高速的通信总线才能将延迟控制得足够小。此外, PWM 输入预处理 D/A 的保持时间即为一个步长, 因此输入到输出的总延迟时间实际会很可观, 通常能够达到 2~3 个步长。

综上, 可以将仿真机的延迟归纳为 3 部分: 输入延迟 T_i 、输出延迟 T_o 以及周期离散化延迟 T_s , 如图 5 所示。从输入到输出的总延迟 $T_D = T_i + T_o + T_s$ 。

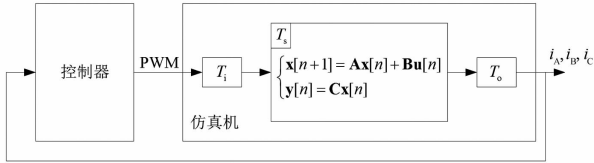


图 5 仿真机的延迟组成

3 仿真系统延迟对滞环控制影响分析

如图 5 所示, 从滞环控制器的视角看, 如果被控对象是真实的逆变器, 当控制器的 PWM 输出后, 那么逆变器立即就会响应; 同时各相并网电流也会立即发送变化, 控制器能够立即感受到该变化, 记此电流为真实电流 i_{abc} 。但采用仿真机模拟真实逆变器后, 由于仿真机从输入到输出存在延迟, 实际上要到 T_D 时刻之后, 控制器才能感受到各相并网电流的变化, 记此电流为延迟后的电流 $i_{abc_delayed}$ 。

在滞环控制器设计时, 其控制率设计为

$$PWM_{abc} = \begin{cases} \text{ON, if } i_{abc_ref} - i_{abc} > I_{band} \\ \text{OFF, if } i_{abc_ref} - i_{abc} < -I_{band} \\ \text{NO change, if } -I_{band} < i_{abc_ref} - i_{abc} < I_{band} \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_{abc_ref} 为电流参考给定; i_{abc} 为反馈电流; I_{band} 为滞环比较带宽。由于仿真机的延迟存在, 送入控制

器的不再是真实的电流 i_{abc} , 而成为了 $i_{abc_delayed}$ 。由此, 滞环比较的过程也将发生变化, 如图 6 所示。

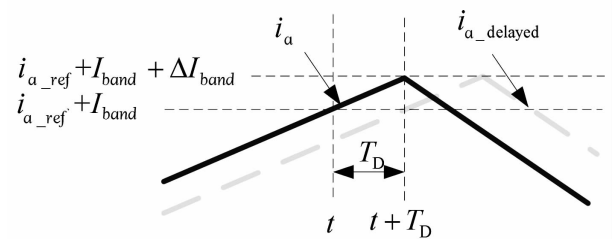


图 6 仿真机有延迟情况下的电流滞环控制过程

当 A 相真实电流 i_a 于 t 时刻上升至上门限 $i_{a_ref} + I_{band}$ 时, 本应在 t 时刻发生滞环比较并因 IGBT 开关动作电流发生转折向下翻转, 但由于控制器实际获得的反馈电流 $i_{a_delayed}$ 尚未达到该上门限, 因此控制器并未动作, 真实电流将继续上升。直到 $t + T_D$ 时刻, 延迟后电流 $i_{a_delayed}$ 到达滞环比较上门限 $i_{a_ref} + I_{band}$ 时, 控制器才动作, A 相真实电流此时才开始下降, 这时真实电流 i_a 已经超出了滞环比较上门限电流, 超出量为 ΔI_{band} 。由图 6 可以计算得到:

$$\Delta I_{band} = \frac{di}{dt} T_D = \frac{u_{dc}}{2L} T_D \tag{2}$$

式中: 电流斜率 di/dt 用 $u_{dc}/(2L)$ 来估计; u_{dc} 为逆变器直流母线电压; L 为并网电感量。

由以上分析可以看出, 仿真机的输入到输出延迟将导致滞环比较带宽增加, 进而降低滞环比较控制的开关频率, 让并网逆变器的电流谐波增大, 使得硬件在环仿真下的控制器性能劣于真实系统, 无法真实有效地模拟真实系统。

4 实验结果

为定量评估仿真系统延迟对滞环控制影响的大小, 采用了对比研究的方式。首先采用纯离线仿真的方式, 来获得被控对象在没有延迟的真实变流器情况下的控制性能, 然后再通过硬件在环仿真获得被控对象在有延迟仿真机时的控制性能。通过对比观察二者的差异。仿真主要参数如表 1 所示。

1) 纯离线仿真验证

纯离线仿真中的控制器和并网逆变器均在仿真软件中进行。控制器采用模型搭建, 但充分考虑实物控制器的所有滤波及延迟环节, 对其进行详细建模, 保证其特性一致。并网逆变器模型使用开关模型, 同时不进行离散化, 保证精度。由于控制器与并

网逆变器都在连续域中, 因此采用变步长连续求解器进行仿真, 最大仿真步长 $1\ \mu s$, 进一步保证精度。

表 1 并网逆变器滞环电流控制仿真主要参数

参 数	值
额定电压/V	690
额定频率/Hz	50
并网电感/mH	0.12
直流母线电压/V	1 150

相电流给定为 400 A, 功率因素为 1, 滞环带宽 I_{band} 设定为 50 A。仿真结果如图 7 所示。

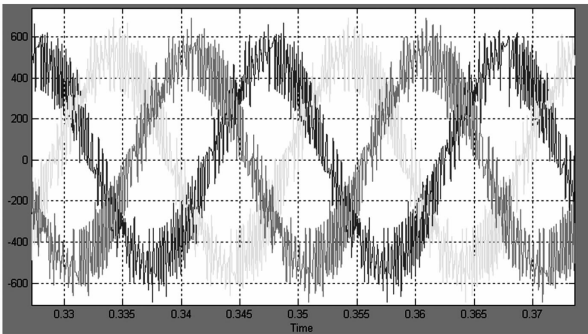


图 7 变流器三相并网电流波形

实测开关频率大约为 2.65 kHz, 并网电流 THD 为 20%。值得注意, 由于基波电流较小, 因此谐波比例相对较大。

当在真实变流器模型中加入 $30\ \mu s$ 延迟后, 仿真获得的电流波形如图 8 所示。

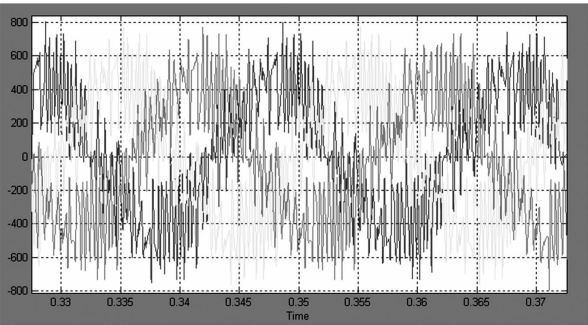


图 8 加入延迟时变流器三相并网电流波形

可以看出, 实测开关频率降低为 1.65 kHz, 电流波形质量变差, 并网电流 THD 上升为 50%。

2) 硬件在环仿真实验验证

控制器采用实物控制器, 硬件在环仿真验证的仿真机采用 RT-LAB, 仿真机采用 OP5600, 实验系统如图 9 所示。其中所关注的控制器是网侧控制器, 其工作于滞环电流控制方式下。接口板实现网侧控制器与 RT-LAB 仿真机的电平接口。

在硬件在环的仿真模型上, 使用 ARTEMIS 和

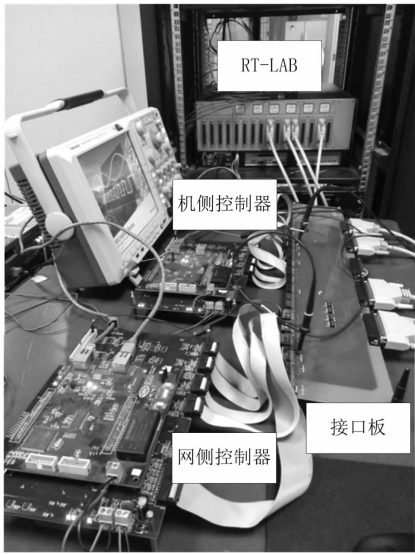


图 9 RT-LAB 硬件在环仿真实验系统

RT-Event 库元件构建被控变流器模型,以提高仿真的实时性。仿真步长为 $10\ \mu\text{s}$,仿真模型如图 10 所示。

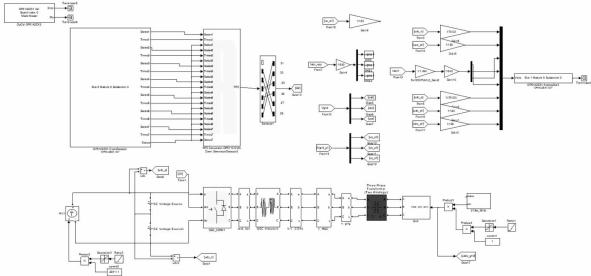


图 10 RT-LAB 中的并网逆变器模型

根据实际测试,步长为 $10\ \mu\text{s}$ 时,仿真机 OP5600 的输入到输出延迟约为 3 个步长,即 $30\ \mu\text{s}$ 。在滞环带宽设定为 $50\ \text{A}$ 时,仿真结果如图 11 所示。



图 11 RT-LAB 硬件在环仿真结果

实测开关频率大约为 $1.55\ \text{kHz}$,并网电流 THD 为 70% 。

对比纯离线仿真结果可以看出,由于输入输出延迟的存在,硬件在环仿真结果比真实结果差很多,并且其开关频率和 THD 与假定有 $30\ \mu\text{s}$ 延迟的真实系统接近,说明硬件在环仿真机的输入输出延迟对滞环控制仿真而言影响非常大。

5 结 语

通过上述研究可以得出,硬件在环实时仿真系统仿真机的输入到输出延迟对滞环电流控制有明显的负面影响,它会导致滞环比较带宽增加,进而降低滞环比较控制的开关频率,让并网逆变器的电流谐波增大,使得硬件在环仿真下的控制器性能劣于真实系统。并且,即使仿真机保持较小的仿真步长,但也可能无法真实有效地模拟出真实的滞环电流控制系统的性能。

同时,通过研究还可以看到,电力电子研发不能过分信任半实物仿真结果,必须要充分认识仿真系统的工作原理、性能和限制,注意甄别其结果的准确性和正确性。对硬件在环仿真,不仅要注重仿真步长,也要注意输入到输出延迟这一技术指标。

直观上,采用具有更高性能的仿真机可以缓解延迟的影响。但需要注意到,缩短输入到输出延迟需要缩短步长以及缩短输入和输出环节的时间。缩短步长意味着更高速的迭代求解,而缩短输入、输出时间意味着采用更高性能的通信总线以及输入输出板卡(高速 FPGA、D/A)等。仿真机求解过程主要是矩阵计算过程,本质上是用数值计算方法求解一系列微分、差分和代数方程组。因此,随着被控对象的复杂化,仿真规模的增加,其计算难度和消耗的时间成倍数增长,缩短步长需要更高速的 CPU 和实时操作系统。同时,仿真机板卡分布式的构架使得通信延迟不可避免,需要高速的并行或者串行总线。总之,这些都将带来仿真机成本的显著提高。并且,随着开关频率的提高,一味地通过提高仿真机性能来解决硬件在环仿真准确度问题的思路并不可取,未来需要考虑其他技术手段来缓解该问题。

参考文献

[1] 吴小田,代同振,肖文静,等. 基于 RT-LAB 的风力发电网侧变流器实时仿真[J]. 电力电子技术,2013, 47 (10):17-19.

[2] 刘静波,肖文静,周宏林,等. 基于 RTDS 的风电网侧变

流器半实物实验[J]. 电力电子技术, 2013, 47(10): 20-21.

[3] P. N. Tekwani, R. S. Kanchan, K. Gopakumar. Novel Current Error Space Phasor Based Hysteresis Controller Using Parabolic Bands for Control of Switching Frequency Variation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2648-2656.

[4] D. M. Brod, D. W. Novotny. Current Control of VSI - PWM Inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1985, IA-21(4): 562-570.

[5] M. P. Kazmierkowski, M. A. Dzieniakowski, W. Sul. Novel Space Vector Based Current Controllers for PWM - inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1991, 6(1): 158-166.

[6] B. K. Bose. An Adaptive Hysteresis - band Current Control Technique of A Voltage Fed PWM Inverter for Machine Drive System[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1990, 27(5): 402-408.

[7] L. Malesani, P. Mattavelli, P. Tomasin. High - performance Hysteresis Modulation Technique for Active Filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12

(上接第 60 页)

需整定的电流元件并带 50 ms 延时后跳变压器各侧断路器^[6]。其逻辑框图如图 11 所示。

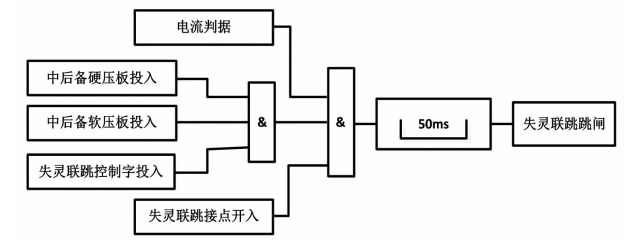


图 11 六统一变压器保护失灵联跳逻辑图

六统一主变压器保护和母线保护之间配合判断主变压器中压侧断路器失灵回路变得相对简单。主变压器电量保护中不存在可整定的失灵延时,而母线保护涉及失灵延时的仅有两个定值,即失灵出口短延时和长延时,如图 10 所示。

2 结 语

失灵保护是高压电网中一种近后备保护,对电网的故障隔离和稳定运行有非常重要的作用。但是因接线方式、保护配置等不同,失灵保护的实现方式存在较大差异。前面介绍了主变压器断路器失灵保护在实际工程中的三种实现方式,即:由变压器非电量及辅助保护装置单独实现;由变压器非电量及辅助保护装置与母线保护装置配合实现;以及由母线

(5): 876-884.

[8] M. Mohseni, S. M. Islam, M. A. S. Masoum. Enhanced Hysteresis - based Current Regulators in Vector Control of DFIG Wind Turbines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(1): 223-234.

[9] M. Mohseni, S. M. Islam. A New Vector - based Hysteresis Current Control Scheme for Three - phase PWM Voltage - source Inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(9): 2299-2309.

[10] C. N. Ho, V. S. P. Cheung, H. S. Chung. Constant - frequency Hysteresis Current Control of Grid - connected VSI without Bandwidth Control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2477-2488.

[11] L. Dalessandro, S. D. Round, J. W. Kolar. Center - point Voltage Balancing of Hysteresis Current Controlled Three - level PWM Rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2477-2488.

作者简介:
周宏林(1984), 博士、高级工程师、副主任研究员, 研究方向为工业控制、电气传动及风力发电技术。

(收稿日期: 2017-09-15)

保护装置单独实现。具体的实现方式要根据工程中所配置的保护装置类型以及二次回路的接线决定。失灵保护的整定计算需建立在充分了解二次回路及保护装置原理的基础上, 否则可能因误整定造成继电保护误动或拒动。

参考文献

[1] 王梅义. 高压电网继电保护运行与设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 139-140.

[2] 南京南瑞继保电气有限公司. RCS-974FG 型变压器非电量及辅助保护装置技术说明书[Z]. 南京: 南瑞继保电气有限公司.

[3] 南京南瑞继保电气有限公司. RCS-915GC 型母线保护装置技术说明书[Z]. 南京: 南瑞继保电气有限公司.

[4] 南京南瑞继保电气有限公司. RCS-915AS 型母线保护装置技术说明书[Z]. 南京: 南瑞继保电气有限公司.

[5] 国家电网公司. 国家电网继电保护整定计算技术规范: Q/GDW 422-2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[6] 国家电网公司. 变压器、高压并联电抗器和母线保护及辅助装置标准化设计规范: Q/GDW 1175-2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

作者简介:
郭晓鸣(1987), 工程师、硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2017-10-17)

轴流式水轮机转轮室模块化消缺技术研究

胥海波,何志萍

(东方电气东方电机有限公司,四川 德阳 618000)

摘要:根据电厂对机组检修的周期要求,结合某水电站 B 转轮室过流部件表面型线的特殊性 & 缺陷特点,形成了该转轮室消缺方案。方案借助模块化思路,提出了"补偿块"修复缺陷的消缺方式,将缺陷区域分解成多个模块,通过更换指定模块的方法达到消缺目的,并研究了该模块化消缺技术在转轮室球面整体更换工艺上的应用。

关键词:轴流式水轮机;转轮室;模块化;消缺;补偿块

中图分类号:TK730.3⁺16 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)01-0067-03

Research of Modular Defect Elimination Technology for Runner Chamber of Axial Flow Turbine

Xu Haibo, He Zhiping

(Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract: According to the requirements of repair cycle, and combined with the particularity and defect features of hydroelectric power plant B, the defect elimination scheme for the runner chamber is formulated. Based on the thought of modularization, the compensation block is proposed to eliminate the defects, which divides the runner chamber into multiple modules and replaces those defective modules with the compensation block. And, the application of the proposed modular defect elimination technology to the overall replacement process of runner chamber is studied.

Key words: axial flow turbine; runner chamber; modularization; defect elimination; compensation block

0 引言

轴流式水轮机组运行多年后,转轮室陆续出现了气蚀、裂纹、局部脱落等缺陷,导致机组运行效率偏低,振动及噪声加大,水轮机过流部件磨损日趋严重,给机组带来极大的安全隐患。对于水电站来说,除了分析缺陷成因外,还需考虑如何消缺,以最快的速度达到发电要求。但目前多数消缺方案进行得不够彻底,转轮室短时间(几年)运行后又陆续出现类似缺陷,严重拖延电站检修周期,影响机组运行。

如何快速、彻底地消除转轮室缺陷成为此论文的研究方向。结合某水电站 A 转轮室消缺经验,彻底解决转轮室局部缺陷的问题。通过前期方案制定、型线测量和补偿块成型与加工的论述,完整地介绍了模块消缺思路、前期准备过程及后期消缺效果。引申至轴流式水轮机转轮室球面整体更换方案的探

讨,提出了一种代替转轮室整体更换的思路。

1 转轮室模块化消缺技术

1.1 转轮室缺陷

水电站 B 为大型轴流式水轮电站,其转轮室设计为 4 瓣结构,出现了总长约 5 m 裂纹性质的缺陷,上下范围约 1.5 m,缺陷高度方向位置正好与叶片转浆区域对应;从圆周方向上看,缺陷基本上贯穿转轮室整个 1/4 圆周。

1.2 转轮室模块化消缺技术

对于这种撕裂、层裂性质的缺陷,从中间将缺陷直接磨开封焊的消缺方案不可行(后续补焊无法生根)。根据缺陷实际情况,借助模块化的思路,提出了“补偿块”替换缺陷区域的消缺技术,即模块化消缺。具体过程分为“测量-成型-加工-现场施工(装焊、修磨、探伤及灌浆)”。

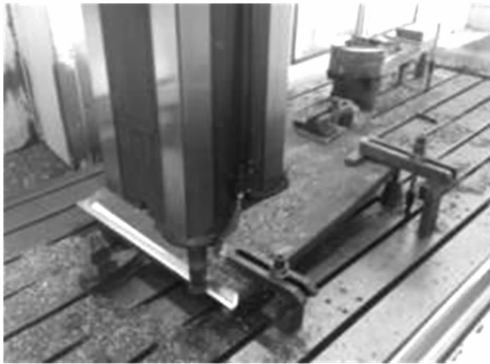


钢板成型过程



成型后

图1 补偿块模压成型



龙门铁加工



镗床加工

图2 补偿块加工

1.2.1 型线测量

缺陷发生在转轮室球面位置,该球面曾进行过修磨处理,与设计型线之间存在较大差异,这样补偿块的型线就不能按照设计型线确定,必须现场测量。

为方便操作,节约测量时间,预先按照转轮室理论型线制造一胶木样板,以转轮室上段圆柱面及“喉部”(即转轮室直径最小处)定位,按转轮室实际型线修磨胶木样板。样板每次定位必须在转轮室同一位置,并保证修磨后样板与转轮室过流面之间间隙小于给定值。

1.2.2 补偿块模压成型

补偿块,即用于替换转轮室缺陷区域、同转轮室设计壁厚及实际型线一致的不锈钢钢板。用于补偿块成型的压模制造非常关键,要求与转轮室实际型线有较高的吻合度,成型质量的好坏直接影响到叶片外圆与转轮室之间的间隙值是否满足运行要求。因缺陷区域呈弧锥形,面积大,所以补偿块等分成5件,每件尺寸为1 200 mm×1 000 mm。每件补偿块成型都必须在同一状态下进行,同时采用轻质检查样板跟踪检查,对于局部不合格的区域采取点压的

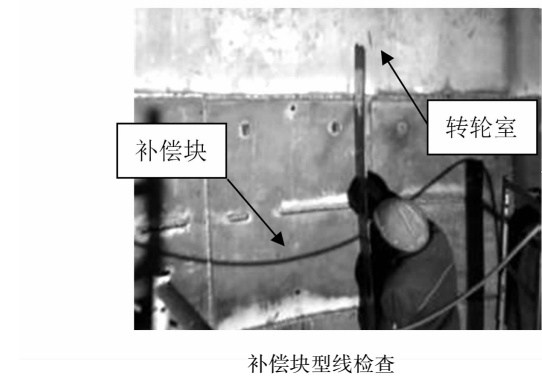
方式进行补偿,如图1所示。

1.2.3 补偿块加工

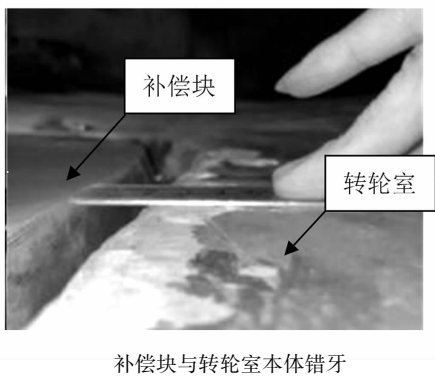
补偿块加工主要指加工补偿块周边坡口、塞焊槽、灌浆孔及焊接吊耳等。

为确保更为精确转轮室型线位置度,应先按样板划出补偿块成型的中心线,再确定四周坡口。不管后续采用划线加工或数控加工,划线工序都必不可少。坡口加工最好采用数控龙门铣进行,整个过程需装夹两次;采用镗床加工亦可,但共需装夹4次,耗时相对较长。加工过程中,装夹定位是关键,补偿块为空间曲面,定位基准不易控制,既要保证装夹牢固,防止加工过程中补偿块移位及剧烈抖动,又要保证补偿块不因装夹过度而产生变形,破坏型线,故需采用“顶压”结合的方式装夹,如图2所示。

为保证补偿块装焊到转轮室本体后具有较高的强度,需在补偿块中间位置开设与原筋板拼焊的塞焊槽。塞焊槽与铣周边坡口同时进行,如图2(右)所示。另外,在补偿块指定位置加工出φ30 mm的灌浆孔及通气孔,方便压力灌浆;焊接吊耳,方便电站起吊和安装。



补偿块型线检查



补偿块与转轮室本体错牙

图3 转轮室模块化消缺技术应用

1.2.4 现场施工

补偿块运输到电站,由工程局负责装焊、探伤、修磨以及压力灌浆。关于现场施工方面,已有文献资料叙述得较为详细,这里不再赘述。

2 转轮室模块化消缺技术的推广与应用

水电站 A 转轮室曾在短时间内出现过多次裂纹及局部脱落的现象。针对脱落部位,仍采用模块化消缺技术进行了修复,虽然修复区域没有水电站 B 大,但缺陷性质一致。水电站 A 转轮室消缺后机组运行过程中的振动、噪声等均表现正常。

水电站 B 转轮室虽没有出现脱落现象,但缺陷范围极广,消缺所替换的转轮室区域成型后的钢板重量达几吨。因补偿块尺寸及过流面形状严格按照现场精确测量的数据加工控制,施工过程中补偿块的安装、焊接、型线、与原转轮室本体接缝处的过渡等都达到了较高的要求,特别是接缝处的过渡,两者型线相差甚微,过渡平滑自然,基本上不需要修磨,如图 3 所示。

转轮室模块化消缺技术在水电站 A、B 的成功应用,对转轮室大面积缺陷及整体更换的问题提供了思路。轴流式水轮机转轮室更换并不需要将整个转轮室全部取出,新做一个转轮室安装上去,可借助模块化消缺技术,将转轮室分成若干模块,分别针对单个模块进行局部割除和替换,最终达到转轮室整体更换的目的。但在此消缺技术实施的过程中,除了必须按照相应的安装规范严格执行外,还须要注意以下几点:

1)需先确定好测量基准。该基准用于确定转轮室中心线位置及测量整体更换后转轮室实际型线

是否符合要求。

2)补偿块与转轮室空间尺寸的对接。现场割除转轮室时尺寸控制相对困难,而补偿块尺寸控制相对容易。故补偿块周边尺寸确定前需复核现场尺寸。

3)背部筋板的固定。新做的补偿块必须开设对应的坡口和塞焊槽,在补偿块安装后通过坡口和塞焊槽与背部的筋板焊接成一体。

4)补偿块装焊完成后进行压力灌浆,填实补偿块背部与混凝土之间的空隙。转轮室产生裂纹跟脱空有很大关系,故在进行压力灌浆时必须确保实施到位,预防二次脱空。

3 结 语

整个模块化消缺工艺实施过程,影响因素较多,效果却超出预期,在空间尺寸连接、合缝过渡、安装等方面都达到了较理想的状态。该方案也为转轮室大面积缺陷及整体更换提供了新思路,相对于重新制造和安装转轮室而言具有成本低、周期短、操作灵活等显著特点。

参考文献

[1] 杜杰,韩涛,向虹光. 铜街子电站转轮室破损部位原因分析及处理措施[J]. 人民长江,2014,45(17):57-59.

作者简介:

胥海波(1985),学士学位、工程师,从事水轮机工艺技术工作。

(收稿日期:2017-10-15)

水轮发电机电磁振动及噪声的分析和改造

梁宇强

(东方电气东方电机有限公司, 四川 德阳 618000)

摘要:针对福建G电站投运后发电机出现的振动大、噪声高的问题,从电磁振动的基本原理出发,分析了引起电磁振动的力波波谱,计算了电磁振动的幅值,得出了原有设计分数次谐波含量过高、定子铁心轭部过小是产生电磁振动超标的根本原因;同时,根据分析结果提出了相应改造措施。改造后的定子大幅度地消除了电磁振动与噪声。

关键词:水轮发电机;电磁振动;噪声;谐波分析;改造

中图分类号:TM312 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)01-0070-04

Analysis on Electromagnetic Vibration and Noise of Hydraulic Turbine and Its Technical Reform

Liang Yuqiang

(Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the excessive vibration and intensive noise of Fujian G power station, the force wave spectrum which causes electromagnetic vibration is analyzed based on the basic electromagnetic vibration theory, and the vibration amplitude is calculated. The research shows that the fundamental reason that causes the vibration is the excessive harmonic and small size of stator core yoke. According to the analysis results, the corresponding reform measures are proposed. The electromagnetic vibration and noise are reduced obviously after the technical reform.

Key words: hydraulic turbine; electromagnetic vibration; noise; harmonic analysis; technical reform

0 引言

福建G电站为贯流式水电站,装有两台国内某公司供货的单机容量21 MW的灯泡贯流式水轮发电机组。其1号机和2号机分别于2007年7月和10月建成投产。两台机投运以后,均存在较为严重的振动及噪声问题。对原设计气隙中谐波的力波波谱进行分析,得出定子16、40、64对极反转磁场与转子基波磁场相互作用产生的力波是产生100 Hz振动的主要原因;定子376对极反转磁场(一阶齿谐波)与转子352对极磁场(11次谐波),以及定子440对极正转磁场(一阶齿谐波)与转子416对极磁场(13次谐波)相互作用产生的力波,是产生600 Hz电磁振动的主要原因。根据上述分析结果,通过重新选择槽数对两台机的定子进行了改造,1号机已于2015年3月投入运行。改造后的发电机彻底消

除了原有电磁振动和噪声,定子运行温度也较改造前有所降低,改造效果突出。

1 原发电机参数

原发电机参数如表1所示。

2 存在的问题

G电站机组投运后,出现了较大的噪声和振动。人站在封水盖板上能够明显听到机组发出“嗡嗡”的高频声响,且有脚麻的感觉,其中1号机噪声明显比2号机大。

经对1号机噪声测试表明,噪声中心频率为630 Hz,且随运行负荷增加而逐步增大,其现场测量值均在100 dB以上,远超过国家混频标准85 dB,比同类型大10~20 dB以上,其中1号机灯泡头入口

处测量得中心频率为 100 Hz 的噪声达 119.8 dB。

振动测试结果表明,带负荷工况下,机座径向振动的主要频率为 100 Hz 和 600 Hz。其中 100 Hz 振动在灯泡头处其振动加速度测量值为 0.954 m/s²,是同类型电站机组测量值 0.11 m/s² 的 8~9 倍;600 Hz 振动加速度测量值 2.29 m/s²,是同类机型(福建 D 电站为 0.328 m/s²) 的 6~7 倍。

表 1 原发电机参数

名 称	参 数
型 号	SFW21-64/6450
额定容量/MVA	23.33
额定功率/MW	21
额定电压/V	10 500
额定功率因数	0.9
额定励磁电压/V	212
额定励磁电流/A	800
额定频率/Hz	50
定子铁心内径/mm	Φ6 000
定子铁心外径/mm	Φ6 450
定子铁心长度/mm	1 200
定子槽数	408
每极每相槽数	2+1/8

3 定子铁心电磁振动分析

3.1 力波波谱分析

电磁噪声本质上是由电磁振动引起的。在分析电磁振动之前,这里首先对磁场中的力波进行分析。

对于 $q = b + c/d$ 的三相分数槽绕组,其中电枢反应磁场谐波极对数为 $v_1 = (6k_1/d + 1)P$, ($k_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$),其中负号表示反转磁场;对于转子磁场,由于磁极的对称性,其磁场只存在奇次谐波,其谐波极对数为 $v_2(2k_2 + 1)P$, ($k_2 = 0, 1, 2, \dots$)。

根据定子铁心振动的一般规律,当极对数为两个磁场相互作用时,产生的力波的节点对数及力波频率如表 2 所示。

表 2 不同极对数谐波对应的力波特性

谐波磁场 极对数	磁场 旋转方向	力波节点对数 M	力波频率 f/Hz
$v_1、v_2$	同转向	$v_1 - v_2$	$f_{e1} - f_{e2}$
		$v_1 + v_2$	$f_{e1} + f_{e2}$
$v_1、v_2$	反转向	$v_1 - v_2$	$f_{e1} + f_{e2}$
		$v_1 + v_2$	$f_{e1} - f_{e2}$

力波节点对数 M 越小,引起铁心振幅越大,所以主要对力波节点对数 M 较小的力波进行分析。

在定子端,鉴于定子基波电流频率为 50 Hz,故由于绕组空间分布引起的空间磁势谐波频率恒为 50 Hz;在转子端,由于磁势谐波随着转子同步旋转,因此转子谐波频率正比于谐波极对数(即 50 Hz、150 Hz、250 Hz、350 Hz……)。

通过力波波谱分析可知:

1)100 Hz 振动主要由定子 $v_1 = 16、40、64$ 对极反转磁场与转子基波磁场相互作用产生;

2)600 Hz 振动主要由定子 $v_1 = 376$ 对极反转磁场(一阶齿谐波)与转子 $v_2 = 352$ 对极磁场(11 次谐波),以及 $v_1 = 440$ 对极正转磁场(一阶齿谐波)与转子 $v_2 = 416$ 对极磁场(13 次谐波)相互作用产生。

3.2 100 Hz 电磁振动分析

电磁力波引起的铁心振动,其振动幅值为

$$A_m \propto \frac{P_n}{E_1(M^2 - 1)^2} \times \frac{1}{1 - (\frac{f}{f_0})^2}$$

(1)

式中: P_n 为谐波磁场与气隙主磁场叠加,在气隙单位面积上产生的径向力,kg; M 为力波节点对数; f_0 为该力波振型的固有频率,Hz; f 为电磁激振频率,Hz; E_1 为定子铁心弹性模量。

其中固有频率 f_0 可按式(2)计算:

$$f_0 = \frac{M \times (M^2 - 1)}{\sqrt{M^2 + 1}} \sqrt{\frac{gE_1J_1}{2\pi G_1R_j^3}}$$

(2)

式中: g 为重力加速度; J_1 为铁心轭部断面惯性矩,cm⁴; G_1 为定子线圈及铁心总重量,kg; R_j 为定子磁轭的平均半径,cm。

计算时,定子铁心弹性模量 E_1 的选择是个重要的问题,它与许多因素有关。根据以往机组振动实测值推断,通常取 $E_1 = 1.3 \times 10^6$ kg/cm² 比较合适。相关计算方法可见参考文献[1],这里不再赘述。

根据 G 电站提供的原厂家定子结构参数,计算出铁心 100 Hz 振动如表 3 所示。

表 3 改造前弹性模量 $E_1 = 1.3 \times 10^6$ kg/cm²

时铁心振动计算				
谐波极 对数 p	谐波占基波 幅值比率/%	力波节点 对数 M	冷态定子铁心 固有频率/Hz	冷态定子铁心 振幅/ μm
16	6.4	16	281.5	2.8
40	5.28	8	87	30.3
64	1.42	32	1 130.8	0.03
总计				33.13

从上面计算结果可知,铁心冷态时,100 Hz 径

向振动幅值超过国家标准允许的 $30\text{ }\mu\text{m}^{[3]}$, 8 对节点力波对应的铁心固有频率 87 Hz; 当铁心处于热态时, 铁心与机座接触, 使得铁心刚度得到提高, 从而铁心固有频率比较接近 100 Hz 激振力频率, 很容易引起铁心共振。

3.3 600 Hz 电磁振动分析

根据波谱分析, 引起 600 Hz 振动的, 主要是定子 328 极以及 376 极谐波与转子 352 极 (11 次谐波) 相互作用产生的。其中定子 376 对极谐波为一阶齿谐波, 其绕组系数与基波相同, 与转子 11 次谐波之间相互作用力也最大, 因此, 600 Hz 振动主要考虑定子一阶齿谐波与转子 11 次谐波作用结果。

通过波谱分析可知, 600 Hz 振动力波节点对数为 24 对。根据电站提供的定子结构参数计算该力波对应的铁心固有频率发现: $M=24$ 时定子铁心计算固有频率约为 634 Hz, 与齿谐波引起的高频磁力激振频率 600 Hz 比较接近, 容易引起铁心共振。

4 改造措施

为了减少电磁振动, 可以通过削弱次谐波幅值, 或者增大力波节点对数来减少振幅。前者可以通过改定子绕组接线, 增大正负相带不对称度, 从而减少绕组系数的方式解决; 后者可以通过重新选槽, 改变谐波极对数解决。由于贯流机尤其是贴壁式贯流机, 引线端的空间非常狭小, 通过改接线的方式实现比较困难, 另外考虑到原厂家定子结构设计存在一些设计缺陷, 因此选择了整个定子重新设计的改造方式。

改造方案确定定子槽数由 408 槽更改为 432 槽。定子槽数的选择主要考虑了几个因素: 首先, 新槽数的选择必须使次谐波引起的 100 Hz 振动大幅度降低, 而且低节点力波对应的定子铁心固有频率远离 100 Hz (一般认为不在 80 ~ 130 Hz 这个范围内是安全的); 其次, 定子一阶齿谐波分量与转子高次谐波作用引起的力波所对应的铁心固有频率远离激振力频率。

5 改造效果

5.1 改造后力波波谱分析

每极每相槽数 q 由改造前的 $2 + 1/8$ 变成改造

后的 $2 + 1/4$, 由于分母减少, 因此分数次谐波也大为减少。按照前面介绍理论进行力波波谱分析, 改造后, 占 100 Hz 电磁振动比重最大的 8 对节点分量消失了, 力波最低节点对数由 8 对提高到了 16 对; 600 Hz 电磁振动的力波节点数由改造前的 24 对节点提高到 48 对节点。根据所提的改造思路, 下面将分别计算 100 Hz 电磁振动幅值以及 600 Hz 振动力波对应的定子铁心固有频率, 以验证改造效果。

5.2 改造后 100 Hz 电磁振动分析

改造后 100 Hz 电磁振动主要由定子 16、64、112 对极反转谐波与转子基波相互作用产生。相应的电磁振动计算结果如表 3 所示。从计算结果可以看出, 改造以后的铁心 100 Hz 电磁振动幅值远远小于国家标准 (GB/T 2423. 10 - 2008) 规定的 $30\text{ }\mu\text{m}$, 达到优良水平。

表 4 改造后弹性模量 $E_1 = 1.3 \times 10^6\text{ kg/cm}^2$

时铁心振动计算				
谐波极对数 p	谐波占基波幅值比率/%	力波节点对数 M	冷态定子铁心固有频率/Hz	冷态定子铁心振幅/ μm
16	6.49	16	332.5	0.0152
64	3.07	32	1 336	0.000 5
112	1.53	80	8 361	0
总计				0.015 7

5.3 改造后 600 Hz 电磁振动分析

对于 600 Hz 电磁振动, 改造前主要由于激振力波对应的铁心固有频率与激振力波频率比较接近引起。改造后, 600 Hz 电磁振动主要是由定子 368 对极以及 464 对极正转谐波 (1 阶齿谐波) 与转子 416 对极谐波相互作用产生的。利用式 (2) 计算这两种力波对应的铁心固有频率如表 5 所示。

表 5 改造后 600 Hz 激振力波对应的铁心固有频率

定子谐波极对数	转子谐波极对数	铁心固有频率/Hz
368	416	3 009
464 (1 阶齿谐波)	416	

从计算结果可以看出, 600 Hz 激振力波对应的铁心固有频率远远高于 600 Hz, 完全消除了改造前铁心存在 600 Hz 共振的情况。

5.4 改造后铁心电磁振动电站实测值

1 号机于 2015 年 3 月 7 日下午并入系统运行, 并按保护、励磁改造要求缓慢上升机组负荷运行, 机组在升负荷运行过程中整体振动声音及发电机电磁声均正常。具体情况如表 6 所示。

表 6 改造前后效果对比

	改造前	改造后
电磁噪声	人耳可听到“嗡嗡嗡” 的电磁噪声	人耳已感觉不到
流道盖板	有强烈麻脚感	麻脚感消失
噪声	满负荷工况下灯泡 头入口处上方 1 m 在改造前测得混频 噪声为 102.4 dB	满负荷工况下灯泡头 入口处上方 1 米在改造 前测得混频噪声 为 92.2 dB

6 结 语

振动和噪声是衡量发电机运行性能的重要指标。对于电磁振动,一般只能通过改定子绕组接线,减少绕组系数来减少谐波幅值,但是绕组端部引线结构复杂;或者重新选择槽数,减少分数次谐波的次数。针

(上接第 52 页)

上海市电力公司对辖区内所有 MGC 型 35 kV 通管均采用该方法进行消缺作业。经过改进的通管均安全正常运行至今,未再发生过一例局部放电事故。进而也验证了所建立的 GIL 通管绝缘子有限元模型能够准确反映通管内实际电场情况,模拟出了绝缘子局部放电的理论本质,对验证改进方案的有效性有着重要意义。

4 结 语

针对 MGC 型 35 kV 通管内绝缘子放电缺陷,建立了绝缘子及通管有限元模型,对正常及支撑螺钉与筒体接触不良工况下通管内的电场及电压分布进行了仿真计算。结果表明,螺钉与筒体间存在缝隙时,电场将在缝隙处产生严重畸变,导致螺钉与筒体间产生十几千伏的电位差。电位差导致螺钉与筒体之间产生间歇性放电,严重影响通管的安全运行。

同时提出了一种缺陷改进方案,即在支撑螺钉末端安装弹簧,恢复螺钉与筒体的电气连接。并对改进方案进行了有限元仿真验证,结果表明改进后通管内电场分布恢复均匀状态,螺钉与筒体间电位差消失,电压由中央导体到筒体均匀下降,消除了局部放电的产生源头。所提改进方案具有施工简便、成本较低的优点。

参考文献

[1] 齐波,张贵新,李成榕,等. 气体绝缘金属封闭输电线

对 G 电站定子引线端空间小,且原设计铁心轭部偏小的特点,确定了重新选择槽数的改造方案。另外还采用了增加铁心压紧、减少线圈、铁心的多项改造措施。由于改造方案采用的措施得当,改造后机组的振动噪声大幅度减少,取得了令人满意的效果。

参考文献

[1] 白延年. 水轮发电机设计与计算[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
[2] 许实章. 交流电机的绕组理论[M]. 北京:机械工业出版社,1985.
[3] GB/T 2423. 10 - 2008, 电工电子产品环境试验第 2 部分:试验方法[S].

作者简介:

梁宇强(1983),工学硕士、工程师,从事水轮发电机设计开发工作。
(收稿日期:2017 - 09 - 15)

路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术,2015,41(5):1466 - 1473.
[2] 王亚楠,丁卫东,苟杨,等. 气体绝缘封闭输电线路接地问题探讨[J]. 高压电器,2016,52(4):98 - 102.
[3] 李鹏,李志兵,孙倩,等. 特高压气体绝缘金属封闭输电线路绝缘设计[J]. 电网技术,2015,39(11):3305 - 3312.
[4] 杨琪. GIL 与 GIS 母线的结构特点与应用[J]. 高压电器,2011,47(8):72 - 74.
[5] 王邸博,唐炬,刘凯. 直流高压下 GIS 支柱绝缘子表面电荷积聚特性[J]. 高电压技术,2015,41(9):3073 - 3081.
[6] 吴超. 直流 GIL 中气体间隙和绝缘子绝缘特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
[7] 张博雅,王强,张贵新,等. SF₆ 中绝缘子表面电荷积聚及其对直流 GIL 闪络特性的影响[J]. 高电压技术,2015,41(5):1481 - 1487.
[8] 李红元,陈禾,吴德贯,等. 用超声波检测法对 GIL 设备两次局放的诊断与分析[J]. 高压电器,2016,52(2):68 - 73.
[9] A. De Lorenzi, L. Grando, A. Pesce, et al. Modeling of Epoxy Resin Spacers for the 1MV DC Gas Insulated Line of ITER Neutral Beam Injector System[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(1): 77 - 87.
[10] K. Watanabe, M. Yoshida, H. Kon, et al. Flash - over Mechanism of SF₆ Gas Type Termination for DC Power Cable[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3):849 - 856.

作者简介:

耿 超(1987),博士,从事电力设备状态检测的研究工作。
(收稿日期:2017 - 09 - 02)

考虑网架对短路电流适应性的输电网扩展规划

陈伟¹, 刘莹², 刘晓宇²

(1. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610001;
2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041)

摘要:随着社会经济的发展, 全社会的用电量越来越大, 这需要更大更坚强的电网来支撑。输电网的扩展规划是电网发展的决策性工作, 关系到整个系统运行的灵活性和费用的经济性。然而, 随着建设规模的扩大, 输电网中迅速增大的短路电流水平严重地危及着电网的安全稳定。从经济性的角度建立了输电网扩展规划的优化模型, 并在规划中考虑了线路的开断对网络阻抗的修正, 更精确地计算了短路电流。选取 Garver-6 节点系统作为算例, 基于遗传算法实现了扩展规划的程序流程, 验证了优化模型的可行性, 证明了在考虑网架结构对短路电流的适应性后, 可以找到适应度更好、更经济的规划方案。

关键词:输电网规划; 短路电流; 网架适应性

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2018)01-0074-04

Transmission Expansion Planning Considering Adaptability of Grid to Short-circuit Current

Chen Wei¹, Liu Ying², Liu Xiaoyu²

(1. State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610001, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The power consumption grows with the social and economic development, so it needs a bigger and stronger power system. As a decision-making work, transmission expansion planning influences the operational flexibility and the cost of whole system. However, with the expansion of construction scale, the rapid increase of short-circuit current in transmission network endangers the security and stability of power grid. An optimization model of transmission expansion planning is established from the prospective of economy, which makes the calculation of short-circuit current more precisely by correcting network impedance. The Garver-6 bus system is used as an example to verify the feasibility of optimization model, and it proves that a better and more economical planning scheme can be found after considering the adaptability of grid to short-circuit current.

Key words: transmission planning; short-circuit current; grid adaptability

0 引言

现代社会的发展对电力系统的依赖性日益增加, 电力系统面临着繁重的规划任务^[1-2]。其中, 输电网规划工作是一项非常复杂的系统工程, 其复杂性突出地表现在其具有规模大、不确定因素多等特点。输电网规划发展的决策性工作, 关系到整个系统运行的灵活性和费用的经济性。

长期以来, 输电系统的优化规划问题一直未能获得令人满意的解决。目前规划方法大致可分为启发式方法、数学优化方法和智能算法三大类^[3-5]。启发式方法根据给定的性能指标对所有的待选线路进行排序, 逐步扩展网络直到满足运行要求为止。这种方法简单灵活, 工程概念明确, 但是却存在着性能指标难以全面反映系统特性以及算法本身难以给出全局最优解的问题。数学优化算法将网络规划问题归纳为标准的数学规划问题, 然后采用相应的优

化算法求解。这种方法往往受到规划问题的复杂性和求解规模的限制而难以达到实用的目的。智能算法简单、直观、计算量小,虽然不是严格的优化方法,不一定得到全局最优解,但是便于人工参与决策,而且能够给出符合工程实际的较优解,因而得到了比较广泛的应用^[6-7]。其中遗传算法就是最为常见的一种。

遗传算法是一种根植于自然遗传学和计算机科学智能优化方法^[8-10]。其实质是将优胜劣汰、适者生存的遗传机理抽象出来,形成一种非常便于计算机实现的算法。遗传算法的计算过程是将实际的优化问题编码成符号串,也称为染色体,实际问题的目标函数则用染色体的适应度函数来表示^[11-13]。

随着建设规模的扩大,输电网中迅速增大的短路电流水平严重地危及着电网的安全稳定。传统的“先规划,后校验”的规划思路未能考虑短路电流的主动性^[14]。因此,下面基于遗传算法,设计了包含考虑断线限流下短路电流修正的三层程序结构,并通过算例证明,考虑了网架结构对短路电流的适应性后,有望找到适应度更好且更经济的扩展规划方案。

所提方案为建立更符合实际的输电网优化规划模型提供了思路,对考虑短路电流的输电网扩展规划研究有一定指导作用。

1 输电网扩展规划优化模型

传统的输电网扩展规划更依赖工程经验,注重规划方案的外送能力和对电网电力平衡的贡献。而所提方案的优化模型则更偏重于经济性。

这里考虑的经济性目标包括:1)在满足输电能力的前提下,使电网建设费用尽可能少;2)扩建后的电网,其每年的运行成本要尽可能低;3)扩建后的电网,其短路电流的增大程度要尽可能低。设计优化模型如下:

$$\begin{aligned} \min F &= F_1 + F_2 + F_3 \\ F_1 &= \lambda_1 \frac{\alpha(1+\alpha)^\omega}{(1+\alpha)^\omega - 1} \sum_{i=1}^k H_i Z_i \end{aligned} \tag{1}$$

$$F_2 = \lambda_2 \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \rho \left(\frac{P_{ki}}{\cos \theta} \right)^2 R_i T_k \tag{2}$$

$$F_3 = \min \left\{ \lambda_3 \sum_{r=1}^{R_r} \sum_{i \in I} (Z_i^* - Z'_{ir}) \right\} \tag{3}$$

式中: F 为一个规划方案的综合年费; F_1 、 F_2 和 F_3 分别为规划方案的电网建设年费、电网运行年费和短路电流惩罚项。

式(1)中: H_i 为第 i ($i < k$) 条线路的决策变量, $i = 1$ 代表建该条线路, $i = 0$ 代表不建该条线路; Z_i 为第 i 条线路的建设成本; α 和 ω 分别是年利率和线路的服役年限。

式(2)中: P_{ki} 为第 k ($k < m$) 种运行方式下,第 i ($i < n$) 条支路上通过的有功功率; $\cos \theta$ 为功率因素; R_i 为第 i 条支路的电阻; T_k 为第 k 种运行方式所占全年时间的比例; ρ 为电价; λ_1 、 λ_2 为人为给定的系数。

式(3)是考虑短路电流影响的惩罚项,惩罚项中仅考虑危害最为严重的节点三相短路电流。若规划出的网架结构能满足三相短路电流的校验,则一定可以适应其他类型的短路。根据三相短路电流的实用计算,可将其等效为节点自阻抗的计算^[15]。该惩罚项本身含有一个寻优过程,即在 r 条可开断线路中寻找最合适的一条线路,使得开断该条线路后,全网短路电流增量最少,并计入目标函数的惩罚项。式(3)中的 R 为可开断线路的集合; Γ 为节点短路集合; Z_i^* 为第 i 个节点处发生短路时,能使规划方案满足短路电流校验的最小自阻抗; Z'_{ir} 为第 i 个节点发生三相短路,通过开断第 r 条可开断线路后, i 节点处修正后的自阻抗; λ_3 为人为给定的系数。

在传统的输电网规划中,通常是先规划出网架结构,再进行短路电流校验,若不满足校验则直接将该规划方案舍弃。而在所提的规划模型中,对于短路电流越限的规划方案,先考虑断开合适的低压线路,在新的网架结构下计算短路电流惩罚项,体现了在规划中考虑短路电流的主动性。

优化模型的主要约束包括:潮流约束、支路热稳定约束、节点最大出线数约束以及无孤立节点约束。

2 扩展规划的程序流程设计

所提的扩展规划采用遗传算法。遗传算法是一种非常便于计算机实现的智能算法,它通过在种群中设置一定数量的染色体并给定最大遗传代数等参数,以适应度计算为核心,通过选择、交叉、变异 3 种遗传操作不断更新种群直至收敛。为实现目标的优化,在所提的程序设计中,共造了 3 个层次。

2.1 外层程序

外层程序是基于遗传算法的输电网扩展规划。对于每条可建线路,都用一个 0 - 1 变量来表示,0 表示不建设该条线路,1 代表建设该条线路,则一个扩展规划方案为一串 0 - 1 序列,编码为一条染色体。适应度函数直接取优化模型的目标函数。其程序流程见图 1。

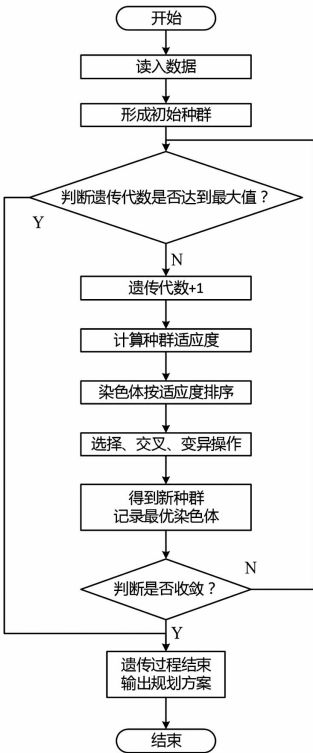


图 1 基于遗传算法的输电网扩展规划程序流程

2.2 中间层程序

中间层是染色体的适应度计算。种群中有成百上千的染色体(即规划方案),先进行潮流计算,判断当前方案是否满足约束。若不满足约束,直接赋予一个值较大的适应度,让不满足约束的方案在遗传操作中逐渐被淘汰掉。若满足约束,则进行短路电流计算,对于不越限的方案可直接计算建设年费和运行年费;对于短路电流越限的方案通过开断线路修正阻抗矩阵,再计算方案的短路电流惩罚项,最后计算染色体的综合适应度。其程序流程见图 2。

2.3 内层程序

内层程序是考虑断线限流的短路电流修正,即对于短路电流越限的规划方案。先考虑断开合适的低压线路,在新的网架结构下计算短路电流惩罚项,以体现在规划中网架对短路电流适应的主动性^[14]。惩罚项的构造见式(3)。对于可开断线路数较少的

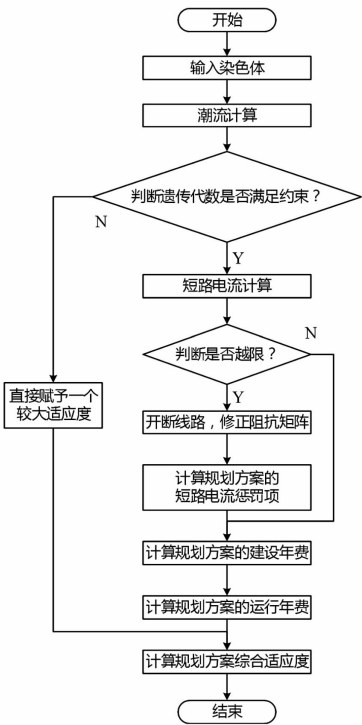


图 2 染色体适应度计算程序流程

情况,一般采用枚举法来寻找能使全网短路电流增量最少的线路;对于可开断线路数较多的情况,可以事先用灵敏度分析来对线路进行排序,再开断搜索出的能使全网短路电流增量最少的线路。

3 算例分析

为验证优化模型的正确性和程序流程的有效性,选取经典的 Garver - 6 节点系统作为算例^[15]。该系统中有 6 个节点和 6 条已建线路,有 1 个孤立节点。设 2 号节点为 500 kV 节点,其余为 220 kV 节点。部分基础数据,如某水平年中各节点的负荷情况和装机情况见表 1。

表 1 基础数据

节点号	负荷/MW	装机/MW	电压等级/kV
1	80	150	220
2	240	0	500
3	40	360	220
4	160	0	220
5	120	0	220
6	0	600	220

线路长度等其他详细数据见参考文献[15]。计算中,功率因数取 0.98,线路服役年限取 20 年,年利率取 3.25%。算例采用 Matlab 进行计算,根据第 1 节和第 2 节中的数学模型和流程编写程序。下

面,对比两种情况下的计算结果:1)考虑断线限流的情况;2)不考虑断线限流的情况。

考虑断线限流的情况下,得到规划结果为:遗传17代后收敛,最优方案适应度为191.4,共建设7条线路。其中,节点1—5新建1条线路;节点2—6新建2条线路;节点3—5新建2条线路;节点4—6新建2条线路,见图3。

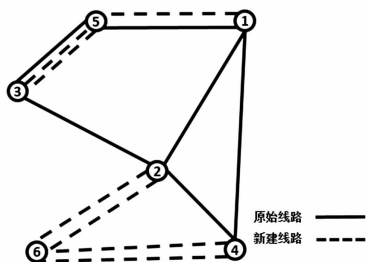


图3 考虑断线限流时的规划网架图

不考虑断线限流的情况下,得到规划结果为:遗传21代后收敛,最优方案适应度为211.7,共建设9条线路。其中,节点1—2新建1条线路;节点1—5新建1条线路;节点2—6新建1条线路;节点3—5新建2条线路;节点3—6新建2条线路;节点4—6新建2条线路,见图4。

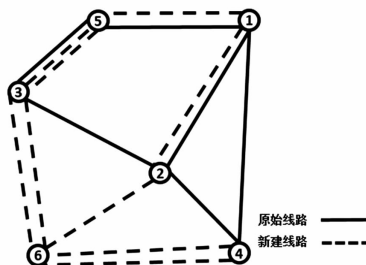


图4 不考虑断线限流时的规划网架图

对比考虑断线限流情况和不考虑断线限流情况下的规划结果,容易看出:在考虑断线限流后,所找出的最优规划方案有更好的适应度,新建线路数也减少了两条,方案更为经济。这是由于在规划中“主动”地修正了短路电流,那些已越限的短路电流,在开断线路的抑制措施下,被修正为越限量更小甚至不越限的短路电流,从而减小了短路电流惩罚项的大小,进一步减小了染色体适应度使其更优。

4 结论与展望

前面从经济性的角度建立了输电网扩展规划的优化模型,基于遗传算法实现了扩展规划的程序流程。在适应度函数的构造中,增添了反映短路电流

影响的惩罚项,并通过考虑开断线路来修正阻抗矩阵,更准确地计算了短路电流。选取了 Garver-6 节点系统作为算例,基于遗传算法实现了扩展规划的程序流程,验证了优化模型的可行性,证明了在考虑网架结构对短路电流的适应性后,可以找到适应度更好、更经济的规划方案。

为简化模型和便于程序计算,仅考虑了三相短路电流。然而其在实际工程中发生的概率较小,进一步的研究可以考虑加入更复杂更常见的短路,如单相短路、两相短路。为使得规划的目标函数更具实际意义,后续研究中可以考虑引入更多反映运行特性的惩罚项,再根据工程偏好通过控制惩罚项的权值来动态调整优化目标。

参考文献

- [1] 王锡凡. 电力系统规划基础[M]. 北京:中国电力出版社,1994.
- [2] 韩晓慧,王联国. 输电网优化规划模型及算法分析[J]. 电力系统保护与控制,2011,,39(23):143-148.
- [3] 周金辉,余贻鑫,曾沅. 大规模风电接入下输电网扩展规划的启发式优化算法[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):66-70.
- [4] 王林梅. 城市电网优化规划问题的研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [5] 聂宏展,王毕元,孙金红,等. 基于混沌人工鱼群算法的输电网规划方法[J]. 电网技术,2010(12):109-113.
- [6] 聂宏展,吕盼,乔怡,等. 基于人工鱼群算法的输电网规划[J]. 电工电能新技术,2008,27(2):11-15.
- [7] 李芸,孟洪斌,李传虎. 基于量子序优化混合算法的输电网规划[J]. 四川电力技术,2011,34(2):44-47.
- [8] 刘丽. 遗传算法在输电网规划中的应用[D]. 北京:华北电力大学,2012.
- [9] 周建平,林韩,温步瀛. 改进量子遗传算法在输电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(19):90-95.
- [10] 黄慧,顾波. 改进遗传算法在电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2012(22):64-67.
- [11] 麻秀范,崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报,2011,36(3):175-181.
- [12] 王秀丽,李淑慧,陈皓勇,等. 基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标多区域电网规划[J]. 中国电机工程学报,2006,26(12):11-15.

(下转第82页)

黑启动方案制定及决策支持实用系统

史华勃¹, 丁理杰¹, 陈刚¹, 袁贵川², 唐伦¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
2. 四川电力调度控制中心, 四川 成都 610041)

摘要:结合四川电网的具体情况,研究了黑启动路径生成、启动初期负荷恢复策略,探索体现负荷恢复数量和恢复速度的实用方法,以及黑启动操作过程中的暂态稳定、过电压等问题的自动校核技术。在此基础上开发了一套电网大停电后恢复方案制定及决策支持实用化系统。利用该系统制定了四川电网大停电后恢复方案,给出了典型水电机组作为黑启动电源在启动初期的负荷冲击量参考值以及黑启动初期建议的恢复策略。

关键词:黑启动;方案制定;决策支持;实用系统

中图分类号:TM76 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)01-0078-05

Formulation of Black – start Scheme and Practical Decision Support System

Shi Huabo¹, Ding Lijie¹, Chen Gang¹, Yuan Guichuan², Tang Lun¹

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

Abstract: Combined with the specific situation of Sichuan power grid, the black – start path generation method and the load recovery strategy in black startup are studied. A practical method for calculating load recovery quantity and recovery speed is presented as well as the automatic checking technology of transient stability, overvoltage and other problems in the operation of black startup. On this basis, a set of black – start scheme formulation and decision support system is developed. The proposed system is used to formulate the recovery plan of Sichuan power grid, and gives the reference value of load impact and the recommended recovery strategy in the early stages of black – start in the system where black – start power supply is hydropower units.

Key words: black – start; scheme formulation; decision support; practical system

0 引言

随着电力系统规模的日益扩大,其网络结构和动态性能也变得越加复杂。近年来,随着可再生能源的大规模接入,其固有的波动性、随机性和间歇性,也给电力系统的安全、稳定运行带来了更大的不确定性和更严峻的挑战。而在市场环境下,电力系统的运行条件更加接近于稳定极限,若局部故障处理不当,极易导致事故扩大,引发大面积停电事故。为了在大停电发生后能迅速恢复系统、减少损失,需要提前制定黑启动恢复方案。

大量文献对黑启动决策理论进行了研究,并开

发了决策系统^[1-3]。但对于大规模电力系统黑启动过程涉及的操作过电压^[4]、空充主变压器励磁涌流引发过电压^[5]等电磁暂态风险,采用广泛应用的商业化仿真软件进行自动校核以及实用的负荷恢复数量和速度控制方面研究较少。在大电网黑启动过程要完成前述风险分析,需要建立海量的仿真模型,耗时耗力,且难以对每个子网、每条启动路径均进行详细分析,从而影响了黑启动策略的科学性和有效性。

针对以上问题,结合四川电网的具体情况研究黑启动路径搜索方法,使搜索出的路径能综合考虑启动风险、负荷恢复速度和机组恢复速度等因素;研究黑启动初期负荷恢复的策略,探索体现负荷恢复数量和恢复速度的实用方法;研究黑启动操作过程

中的暂态稳定、过电压等问题的自动校核技术。在研究基础上开发了一套电网大停电后恢复方案制定及决策支持实用化系统,并应用该系统完成了四川电网黑启动方案制定和校核,给出了黑启动初期建议的恢复策略和冲击负荷投入策略。

1 系统总体设计方案

所设计系统基于大电网已有的机电暂态数据,实现快速的黑启动方案生成、全面的电磁暂态及机电暂态风险分析和对比,并能对方案校验结果予以保存和分析,基于相关的技术标准和专家经验,给用户 提供黑启动辅助决策。

系统的核心功能包括:1) 电网机电暂态数据的解析及拓扑识别;2) 黑启动方案生成;3) 黑启动方案校验;4) 黑启动方案管理。系统总体架构如图 1 所示。

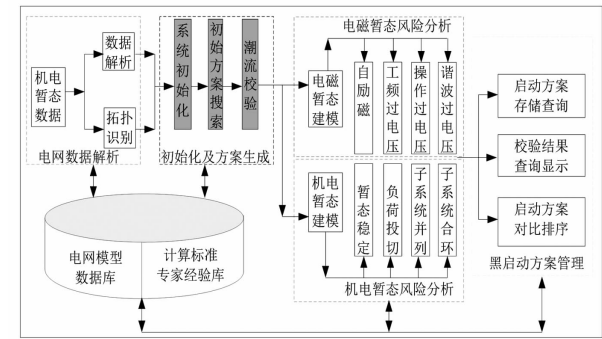


图 1 系统总体架构

2 系统关键功能实现

2.1 电网数据的解析和厂站划分

鉴于 PSD - BPA 在电力系统中的广泛使用,软件系统的数据源取自 BPA。电网数据解析包括对潮流 DAT 文件及稳定 SWI 文件的解析^[6]。根据 BPA 软件说明,按照各卡片的格式^[7-8],按字段截取并理解,建立“母线 - 厂站”映射表和“厂站 - 分区”映射表,对电网进行全局拓扑识别。

在此基础上,对电网数据进行“再理解”,按人的思维,将电网数据分为 3 个层次:分区、厂站和设备。采用深度优先搜索的方法,识别出每个电厂和变电站内部拓扑,其中将厂站又根据其拥有的设备类型划分为:水电厂、火电厂、风电场、光伏电站等。

解析好的电网数据,由厂站设备字典、母线 - 厂站字典、厂站 - 分区字典组成。数据解析流程如图 2 所示。

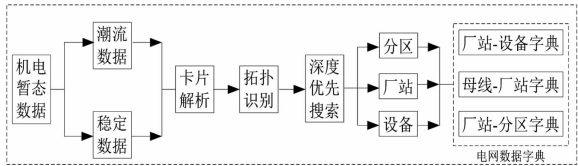


图 2 数据解析和厂站划分流程

2.2 黑启动方案生成

生成黑启动方案,首先要生成可靠的黑启动路径,需要搜索从黑启动电源至被启动机组的路径。该模块主要包括 3 大功能:黑启动区域设置、黑启动路径生成、黑启动方案编辑。

1) 黑启动区域设置

对于大电网,需要分区制定黑启动方案,要先收缩电网数据,限定方案搜索的范围。通过设置筛选条件指定黑启动方案涉及的厂站集。

筛选时,分区的筛选是利用数据解析时生成的“母线 - 厂站”字典和“厂站 - 分区”字典,而电压等级、厂站名的筛选则是利用数据解析拓扑后生成的厂站设备集。

2) 黑启动路径生成

黑启动路径的生成,既要考虑到最短路径搜索的自动性,也要考虑用户自定义的特殊性,所开发的系统提供给了用户两种路径生成的方法。既可以自动搜索生成,也可以用户手动指定生成,得到的黑启动方案都可以存入“原始方案库”,供用户方案校验时使用。

软件采用前 K 最短路径算法,如果采用自动搜索生成,则需要设定起始厂站、终端厂站和 K 值,代表将搜索前 K 个从起始厂站到终端厂站的最短路径,此处最短指的是路径所含线路的权重和最小;如果采用手动指定生成,则只需要设定起始厂站,系统会根据起始厂站不断引导用户辐射向待启动电厂。

手动指定方案只需要指定“起始厂站”,与 K 值和终端厂站无关,与设置的黑启动区域也无关,可以全网手动指定路径。通过下拉列表选择连接母线的变压器卡和线路卡,下一个母线名自动显示。这利用的是电网数据解析时的拓扑关系,根据节点自动获得其相邻支路。

3) 黑启动方案编辑

由于黑启动时系统环境较为复杂多变,某设备

的故障会引起黑启动路径的变化,故该系统允许用户对已生成的黑启动方案进行编辑,为了保证黑启动方案的可行性,程序自动检测节点的相邻支路,以节点毗邻的方式不断向外延伸来增加设备,通过增删相应电网数据卡,实现方案的完全自定义。黑启动方案生成流程如图 3 所示。

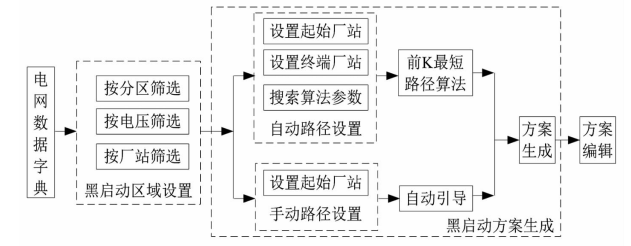


图 3 黑启动方案生成流程

2.3 黑启动方案自动校验

黑启动方案是否可行,取决于它是否能通过相关的校验。系统首先对黑启动方案进行潮流校验,潮流校验通过后的方案再进行电磁暂态和机电暂态风险校验,潮流校验不通过的方案认为是不可行方案。

电磁暂态方面的校验包括:2% 统计操作过电压校验、单相接地甩负荷和无故障三相甩负荷工频过电压校验、自励磁校验、空充主变励磁涌流引发谐波过电压校验。机电暂态方面的校验包括:投负荷校验和暂态稳定校验以及子系统并列、合环过程风险校验。

黑启动校验步骤为如下:
1) 根据黑启动方案,按启动步骤分解为厂站启动、线路启动两个方面。厂站启动主要包括主变压器空充过程、电源及负荷投入过程,线路启动主要为空充线路操作过程。

2) 根据启动步骤,系统自动拼接生成该步骤对应潮流文件、电磁暂态和机电暂态仿真模型文件。在潮流校验通过后,采用 ATP – EMTF 执行电磁暂态仿真,用 PSD – BPA 执行机电暂态仿真。本步骤中,机电暂态仿真主要给出各站单次负荷冲击量限值以及最大负荷投入量限值,主要考虑的问题为:负荷投入后系统最低频率不引发低周减载动作,仿真中应考虑机组调速器为孤网参数。

机电暂态校验给出各站负荷投入量后,建立电磁暂态模型,在此基础上对各步骤启动过程过电压水平进行校验。

3) 启动过程机电暂态校验完成后,给出各站负荷投入水平,并根据启动方案自动建立全区域机电

暂态模型,进行相关的稳定校验。

4) 最后将过电压校验和暂态稳定校验结果读入决策分析模块,利用相关的标准和专家经验,对比后给出最优的黑启动决策。黑启动方案自动校验流程如图 4 所示。

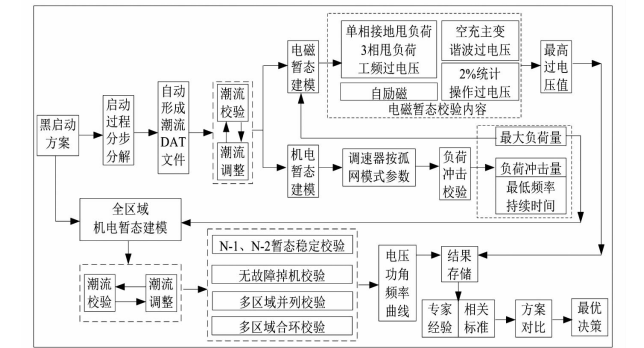


图 4 黑启动方案校验流程

2.4 黑启动方案可行性判据

系统黑启动过程过电压应不超过相关标准、规范等的要求,对于无标准的应不超过运行经验给出的过电压值。负荷恢复量还应进行暂态过程校验,负荷投入后最低频率不应触发低周减载动作。黑启动过程中,投负荷对系统的影响主要体现在电压和频率的短时间大幅度下降,在投入同样负荷量的情况下,系统暂态最低频率较大、最低电压较高的黑启动方案是更优秀的。同理,在最低频率相同的情况下,投入负荷量更大的黑启动方案更优秀。启动过程过电压风险最小、稳定风险最小、启动负荷最多的方案则被认为是最优黑启动方案。电磁暂态和机电暂态校验中参考的具体判据^[9-10]如下:

1) 潮流合理性判据:黑启动方案初始正常潮流计算结果应符合:电厂母线电压在 0.95 ~ 1.05 p. u. 范围内,并且机组的有功、无功在正常范围内;黑启动初期暂不考虑 $N - 1$ 安全;无功功率分布符合分层、分区平衡的原则。

2) 暂态稳定判据:黑启动子系统在并列前,大扰动后引起该子系统各机组之间功角相对增大,经过第一、第二摇摆不失步;大扰动主要考虑线路 $N - 1$ 和 $N - 2$ 故障以及机组无故障甩负荷。

3) 操作过电压判据:对于长度小于 100 km 的线路,无需做操作过电压校核,根据工程经验,认为其操作过电压不超标。220 kV 及 500 kV 系统操作过电压采用以下判据:①500 kV 线路 2% 统计操作过电压(相电压峰值)不超过 2.0 p. u. (1.0 p. u. =

550 × $\sqrt{2}/\sqrt{3}$ kV); ②220 kV 线路 2% 统计操作过电压(相电压峰值)不宜超过 3.0 p. u. (1.0 p. u. = 252 × $\sqrt{2}/\sqrt{3}$ kV)。

4)工频过电压判据:500 kV 系统工频过电压水平合格的判据为线路断路器的变电站侧的工频过电压不超过 1.30 p. u. ,线路断路器的线路侧的工频过电压不超过 1.40 p. u. (1.0 p. u. = 550/ $\sqrt{3}$ kV); 220 kV 系统工频过电压水平合格的判据为工频过电压不超过 1.30 p. u. (1.0 p. u. = 252/ $\sqrt{3}$ kV)。

5)自励磁判据:当发电机带空载长线时,不发生自励磁的理论判据如式(1)。

$$W_N > Q_c \times X_d$$

(1)

式中: W_N 为发电机额定容量,MVA; Q_c 为考虑高抗或低抗补偿后的线路剩余充电功率,Mvar; X_d 为发电机等值同步电抗(包括升压变漏抗,以发电机容量为基准的标么值)。自励磁校核时首先采用理论判据进行初步风险排查,对于明显无自励磁风险的方式不再进行电磁暂态仿真分析,对于可能存在自励磁风险的方式应进行电磁暂态仿真校核,参考工频过电压判据。

6)谐波过电压判据:谐波过电压计算,变压器均考虑饱和特性,励磁特性曲线的拐点取 1.1 p. u. ,变压器最大剩磁按照 40% 考虑。对谐波过电压参考标准取值见表 1、表 2,最高过电压不宜超过表中最大值。

表 1 谐波过电压参考标准 1

电压等级 /kV	系统最高运行 电压/kV	相电压峰值 基准/kV	1.3 倍相电压 峰值/kV
110	126	102.9	133.7
220	252	205.7	267.5
500	550	449	583.7

表 2 谐波过电压参考标准 2

电压等级 /kV	系统最高运行 电压/kV	相间电压峰值 基准/kV	倍相间电压 峰值/kV
35	40.5	57.27	99.19

2.5 黑启动方案管理

该模块主要包括以下两个功能:

1)黑启动方案校验结果查询与分析

黑启动方案生成之后存入“原始方案库”,黑启动方案校验之后存入“已校验方案库”,所有黑启动方案均按文件夹存放,一个方案一个文件夹。用户

在查询和管理黑启动方案时,可能需要对方案进行适当的编辑和修改,故开发了可视化的电网数据编辑器,通过对电网数据进行实时解析,实现电网数据的可视化编辑。当用户要编辑某数据卡时,程序会自动解析该行数据给予用户提示,方便用户对方案进行编辑。

2)黑启动方案对比和排序。

黑启动过程中,投负荷对系统的影响主要体现在电压和频率的短时间大幅度下降,故软件统计了每个方案在投入一定量负荷后系统的暂态最低频率和最低电压。以此可以评价多个方案的优劣,并对方案进行排序。

3 四川电网的应用

开发的电网大停电后恢复方案制定及决策支持系统部分界面如图 5 和图 6 所示。



图 5 系统应用界面

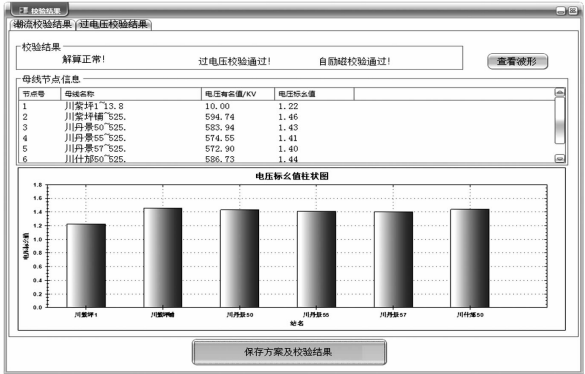


图 6 过电压校核界面

利用开发的决策支持系统,制定了四川电网 11 个子系统启动方案并进行了风险校核,在此基础上进行了子系统间并列操作风险校核。最终形成了四川电网大停电后恢复方案,给出了典型水电机组作为黑启动电源在启动初期的负荷冲击量参考值、黑

表 3 机组参数和负荷冲击量参考值

电厂	类型	容量/MW	T_j/s	T_w/s	调速器			负荷冲击/MW	间隔时间/s
					K_p	K_i	K_d		
1	混流式	200	7.65	2	1.5	0.15	0.5	7.5	40
2	混流式	129	7	2.5	1.5	0.15	0.5	6	40
3	混流式	88.89	6	1.5	1.5	0.15	0.5	4	40
4	冲击式	133.3	7.95	0.01	1.5	0.15	0.5	6	40
5	轴流转桨式	176.5	5.88	2.5	1.5	0.15	0.5	7	40

启动初期建议的恢复策略：

1)黑启动初期负荷单次冲击量大小以及负荷投入时间间隔可参考表 3 进行,表中 T_j 为机组惯性时间常数, T_w 为水锤时间常数,调速器参数为控制器 PID 参数。

2)在水电通道上的子系统与其他子系统并列时,常常会出现过电压问题,应注意在并列点两侧合理投切低压电抗器以抑制电压偏高。

3)由于风电厂和光伏电厂对调频调压无贡献,反而会恶化黑启动初期电网的稳定性。在子网与外部电网并列前,建议禁止风电、光伏电厂并网,待子网与外部电网并列后,才可以并网。

4)黑启动初期,为防止空充主变压器对启动电源造成破坏,启动电源宜带下一级变电站主变压器零起升压,该变电站带上一定负荷后再考虑后续变电站空充主变压器。

4 结 论

前面研究了黑启动初期负荷恢复的策略,探索体现负荷恢复数量和恢复速度的实用方法,并进一步研究了黑启动操作过程中的暂态稳定、过电压等电磁暂态问题的自动校核技术。在此基础上开发了一套电网大停电后恢复方案制定及决策支持实用化系统。利用开发的决策支持系统,制定了四川电网 11 个子系统启动方案并进行了风险校核及子系统间并列操作风险校核。最终形成了四川电网大停电后恢复方案,给出了典型水电机组作为黑启动电源

(上接第 77 页)

[13] 盛四清,王浩. 用于配电网规划的改进遗传算法[J]. 电网技术,2008,32(17):69-72.

[14] 张思. 考虑短路电流的输电网优化规划[D]. 杭州:浙江大学,2012.

[15] 张勇,王云辉,沈建涛,等. 输电网短路电流计算[J]. 电网技术,2007(S1):39-42.

在启动初期的负荷冲击量参考值、黑启动初期建议的恢复策略。

参考文献

[1] 王洪涛,刘玉田,邱夕照. 基于分层案例推理的黑启动决策支持系统[J]. 电力系统自动化,2004,28(11):49-52.

[2] 苏德生,顾雪平,赵书强,等. 河北南网黑启动决策支持系统的研究开发[J]. 电力系统自动化,2004,28(12):45-50.

[3] 周云海,闵勇,杨滨. 黑启动及其决策支持系统[J]. 电力系统自动化,2001,25(15):43-46.

[4] 马燕峰,赵书强,顾雪平,等. 黑启动过程中操作过电压的仿真计算[J]. 高电压技术,2006,32(11):123-126.

[5] 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):24-31.

[6] 罗彬,李刚,程春田,等. 基于 PSD-BPA 的省地一体化电力系统设备参数管理策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(6):114-119.

[7] 汤涌,卜广全,印永华,等. PSD-BPA 潮流程序用户手册[S]. 北京:中国电力科学研究院,2008.

[8] 汤涌,卜广全,印永华,等. PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册[S]. 北京:中国电力科学研究院,2008.

[9] DL/T 620-1997,交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].

[10] Q/GDW 1404-2015,国家电网安全稳定计算技术规范[S].

作者简介：

史华勃(1987),硕士、工程师,主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

(收稿日期:2017-11-02)

作者简介：

陈伟(1974),工程师,主要研究方向为变电运维检修、配网自动化;

刘莹(1985),工程师,主要研究方向为电网规划设计、电力系统分析与稳定;

刘晓宇(1986),工程师,主要研究方向为电网规划设计、电力系统分析与稳定。

(收稿日期:2017-09-18)

基于大数据的中压供电可靠性管理系统

陈善兵, 赵 静

(国网四川电力公司宜宾供电公司, 四川 宜宾 644000)

摘要:大数据技术的应用可以极大优化配电网的中压供电可靠性管理。对大数据概念及大数据技术在电力领域中的分析方法进行介绍。研发了一种基于大数据的中压供电可靠性管理系统,该系统可实现如下功能:得到某地区城网、农网的供电可靠率;分析该地区的重复停电情况(包括线路重复停电、台区重复停电);分析对计划停电情况;提供配抢效率分析、停电损失估计等优质服务。该系统分析结果可供工作人员参考,提高中压供电可靠性。

关键词:大数据;中压供电可靠性管理系统;重复停电;优质服务

中图分类号:TM72 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2018)01-0083-06

Reliability Management System for Medium Voltage Power Supply Based on Big Data

Chen Shanbing, Zhao Jing

(State Grid Yibin Power Supply Company, Yibin 644000, Sichuan, China)

Abstract: The application of big data technology can greatly optimize the reliability management for medium voltage power supply of distribution network. The concept of big data and the analysis methods of big data technology in the field of electric power are introduced. A reliability management system for medium voltage power supply based on big data is developed: it can get the information of power supply reliability for urban power grid and rural power grid. It can analyze the repeated blackouts rate in one area (including repeated blackouts on lines and repeated blackouts of transformer districts) and the planned blackouts, and can provide the quality services such as fault repair efficiency analysis for distribution network and power outage loss estimation. The analysis results of the proposed system can provide a reference for the staff to improve the reliability of medium voltage power supply.

Key words: big data; reliability management system for medium voltage power supply; repeated blackouts; quality service

0 引言

大数据的概念:对海量种类、来源复杂的数据进行快速采集、发现与分析,用经济的方法发掘数据的价值体系、技术架构^[1]。大数据不仅指海量数据,而且还囊括了研究这些数据的方法、理论及技术。电力系统是大数据应用的重要范畴^[2]。由于智能电网的飞速发展,电力系统产生了大量结构多元化、来源复杂的电力数据,这些数据具有巨大的潜在利用价值,可提升电网管理、运行水平,甚至产生历史性变革。

近几年,国内外逐步兴起大数据技术在配电网

中的应用研究。2013年美国EPRI启动了两项大数据项目,其一就是配电网现代化示范(distribution, modernization, demonstration, DMD)^[3];美国加州大学等机构对洛杉矶电力数据进行研究,将街占地面积、区建设时间以及平均收入等数据全部整合在一起,以地图的形式展现了2011年1月至2012年6月各街区各月平均耗电量^[4];法国电力公司(EDF)研发了以大数据为基础的用电采集系统,该系统主要是以电表数据为主,再结合气象数据、用电合同信息、电网数据等构成大数据的数据来源^[5]。

中国也对智能配电网大数据技术与应用进行了研究,华北电力大学对用户侧大数据分析并与负荷预测进行了研究^[6];江苏省电力公司从2013年开

始建立营销大数据智能分析系统,该系统目前已囊括了电压等级、气象、行业等9个维度的数据分析模型和多项关联性分析模型,多视角解析整个省的电力用户数据^[7]。

下面首先给出了电力大数据基本概念,然后对大数据技术在电力系统中的运用进行分析,并设计了一种中压供电可靠性管理系统。该系统对导入的OMS大数据进行清洗、筛选、分类后,可以分别得到该地区城网、农网的供电可靠率;可给出该地区重复停电情况(包括线路重复停电、台区重复停电);对计划停电进行分析;提供抢配效率、故障停电与计划停电损失预估等优质服务。本系统的分析结果可给运行人员提供一定的参考,实地核实停电多发台区的情况,以减少停电次数,提高中压供电可靠性。

1 电网大数据及分析技术

随着电力信息化的发展,电力数据规模迅速扩大,种类也快速增加,这些各种各样的数据组成了智能电网大数据库。

根据数据来源,电网大数据可以分为两大类^[8-9]:电网内部数据、外部数据。内部数据来自用电信息采集系统(collection system information, CIS)、营销系统、广域监测系统(wide area measurement system, WAMS)、配电管理系统、生产管理系统(production management system, PMS)、能量管理系统(energy management system, EMS)。外部数据主要来自地理信息系统(geographic information system, GIS)、电动汽车充电系统、公共办事部门、网络等。

这些数据相互影响、关联,关系复杂。例如社会经济发展状况影响着用户用电情况,用户用电状况又影响着电力交易情况。总结各界对数据特征的定义,再结合智能电网电力数据的特征,将智能电网电力大数据特点总结成以下几点:1)数据的来源是各个分散安置、分布管理的系统;2)数据数量多、维度高、类型繁多;3)对电力公司、电力用户以及社会经济发展有重要的作用;4)数据间潜在的关系错综复杂,可对其进行挖掘,大部分情况下有实时性要求。

数据挖掘(data mining)指从海量的数据资料中获取潜在有用的并且最终可理解的信息与知识的过程^[10,13]。从数据挖掘的功能出发可分为如下几类:

1)关联分析:关联分析是为了找出数据中潜在

的关系网,通过关联分析可得到较多的关联规则,通过设置合适的“可信度”、“支持度”阈值删除一些多余的关联规则来获取有用的规则。

2)数据分类:根据特征性描述、区别性描述对数据进行分类,特征性描述是针对同类数据的共性进行描绘;区别性描述是对两个及以上类别之间区别的描述。

3)聚类分析:将定量数据按照相似程度划分为不同类的过程,划分为同一类的样本数据具有较大的相似性,不同类的样本之间则表现出较明显的差异性。

4)趋势分析:即时间序列分析,从数据随时间变化过程中发现规律、趋势。趋势分析与关联性分析相同,都是为了发掘数据内潜在的联系,但趋势分析主要是研究数据的前因后果关系。

5)偏差检测:从海量数据库中检测出明显异常的偏差数据有重要意义。通过检查发现这些异常,并从数据库中将其剔除,可提高数据库使用价值。

6)数据预测:通过对历史数据的建模分析,结合当前的数据,运用所建数学模型实现对数据的未来变化趋势的预测。

数据挖掘的过程涉及到数据统计、数据库存储、人工智能和机器学习等领域,通常情况下,数据挖掘的过程包括如下几个步骤^[11-12]:

1)异常数据清除:剔除噪声数据和不一致的数据。

2)数据集成:将不同类型的数据组合在一起。

3)数据选择:从大数据中筛选与任务相关的数据。

4)数据变换:将数据变换为适合发掘分析的数据模式。

5)数据挖掘:从统一后的数据结构中发掘出相应的数学模型。

6)信息表示:用简洁的方式显示发掘出的信息。

7)规则验证:用其他数据验证数据挖掘结果的精确度。

该流程中前4步是对数据进行预处理,是信息挖掘的关键阶段,直接影响数据挖掘的效果。在这个阶段中可采用多种方法处理,剔除错误、虚假的数据,得到有用信息;然后运用数据挖掘技术从中发掘出潜在的关联规则,并用简单、可视化的方式对知识

进行表达。

2 中压供电可靠性管理系统

基于前述技术开发了一种基于大数据的中压供电可靠性分析管理系统。

该系统分为 4 层:数据资源层、处理层、公共服务层、业务应用层。系统组成结构如图 1 所示。

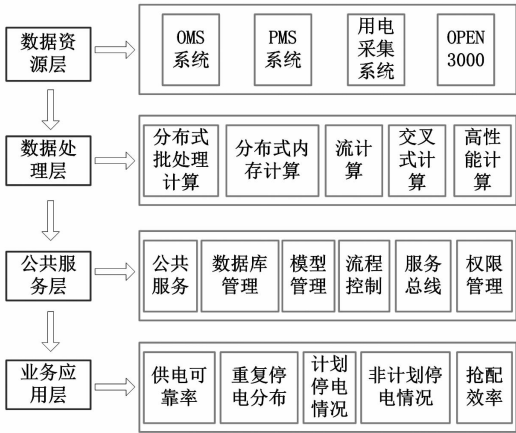


图 1 中压供电可靠性管理系统结构

1)数据资源层:通过在 PMS 系统、OMS 系统、Open3000、用电采集系统等系统中,导出其源数据,将源数据载入到系统中,在载入时,系统会根据数据清洗算法,对数据进行清洗,排除异常数据,提高准确性。

2)数据处理层:数据处理层集成了数据挖掘算法,有分布式内计算、流计算、交互式计算、图计算、高性能计算。通过处理后将结果反馈给下一层。

3)公共服务层:公共服务层是从技术方面为业务层的功能提供服务,包括可视化管理、事件管理和、报表分析等。

4)业务应用层:主要包括数据的不同功能展示,如节电、用电预测、网架优化、错峰调度结果等功能均通过该层输出所需结果。

所设计系统经用采系统获取数据,由于国家电网公司的用采数据中存在很多问题,比如采集器故障、周期性故障、网络传输故障等,所以在进行分析之前需要对数据进行清洗。根据大数据算法对台区停电情况进行分析、研判,确保停电数据的真实性与可靠性。再根据不同维度(如地区、线路、台区、时段等)对数据进行分表展示,使用户能够自定义分析维度,进行自主分析。

3 中压供电可靠性管理系统功能

3.1 供电可靠率的概念

随着市场经济的迅速发展,用户对供电质量的要求越来越高,供电可靠性已成为电力企业衡量的因素之一。供电可靠率是指统计周期内配电网对用户有效供电总小时数与统计周期内总小时数之比。

$$\rho = (1 - \frac{\sigma}{\tau}) \times 100\% \tag{1}$$

式中: σ 为用户平均停电时间; τ 为统计时间。

从式(1)可知要提高供电可靠率,实质上就是要降低统计周期内用户的总停电时间。这可以从降低故障停电次数、降低停电重复率以及降低停电户数来帮助解决该问题。

3.2 供电可靠性分析

当前的停电管理系统中,所有的停电都是一线班组收稿操作,这加大了工作人员压力,数据准确性也有待进一步提高,所以需要一种可以自动记录和分析停送电研判的算法对停送电进行管理;在精确记录台区内停电情况的同时,尽可能减少一线工作人员的工作量,提高自动化业务管理水平。

所设计系统的停电研判方案是根据电力用户采集系统、OMS 系统、PMS 系统、变电站 10 kV 线路总表等数据对停电的可信度进行分析研判,以提高停电研判的正确度。

对系统中输入的某地区数据进行处理,选择展示日期,通过分析筛选,对该地区停电的可信度进行分析研判,输出的结果如图 2 所示。从该地区 2017 年前 7 个月供电可靠率的变化趋势可见 6 月份该地区供电可靠率稍有降低。从停电平均时户数也可知 6 月份停电户数最多;该地区总停电 548 次,平均供电可靠率高达 99.91%。

3.3 重复停电分析

如今在电网运行分析中还没有开展有效的重复停电管理分析,本系统主要帮助企业实现:

- 1)量化统计分析台区、线路重复停电问题;
- 2)提升企业全面掌控台区重复停电的能力。

本系统利用大数据监测方案。以电力系统的大量运行数据为基础,总过程可分为大数据采集、清洗、监测分析、闭环跟踪等环节。对台区重复停电情

况进行量化、归集分析。实现框图如图 3 所示。

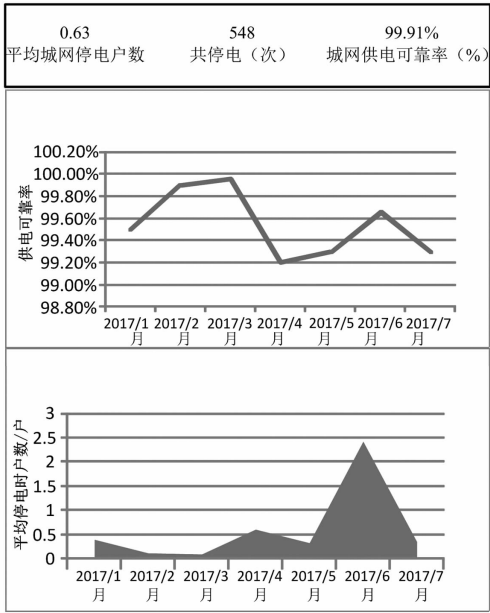


图 2 某市城网供电可靠性分析

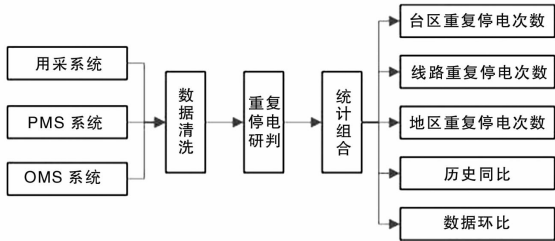


图 3 停电管理系统

在处理数据时,对每条停电数据设置可信度百分比,从而能灵活识别台区停电情况。模型主要考虑如下几个因素:

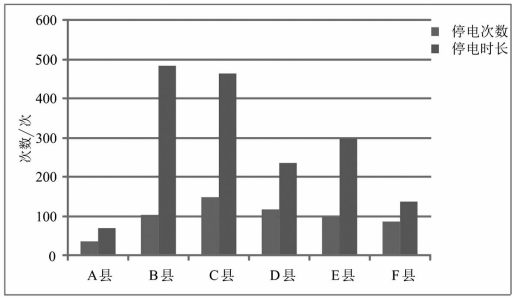
- 1) 自动计算监测周期内电压和电流曲线子表中相应记载的数据,如果所记载点数百分比大于等于 90%,则认为此台区的总表运行正常;
- 2) 停电时间高于 1 h 的台区在该停电时间内是否有数据记载,如果有,则说明地区停电的可靠性较低;
- 3) 停电之前以及恢复供电后 2 h 内是否有电压、电流记录,如果有则认为台区停电比较可信。

基于以上 3 个因素的数据计算模型可以提升台区供电可靠率的可靠性。

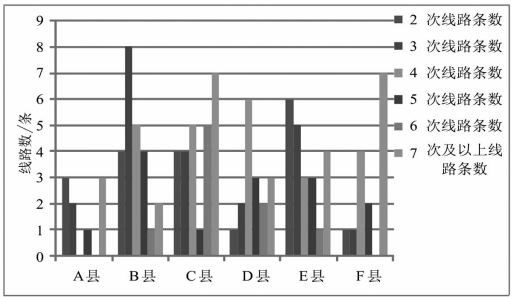
3.3.1 线路重复停电分析

对某市的重复停电情况进行分析,设置展示时间段为 2016 年 1 月至 2017 年 11 月,对某地区各个城市的线路重复率进行展示,结果如图 4 所示。据图 4(a)可知在数据统计期间该地区总停电 590 次,

停电总时长为 1 690. 17 h。据图 4(b)可知重复停电 2 次的有 16 条线路、3 次的有 20 条线路、4 次的有 23 条线路、5 次的有 13 条、6 次的有 9 条、7 次及以上的有 23 条线路。发生重复停电的系数高达 104 条,可见该地区线路重复停电现象比较严重。可进一步核实,调查原因,加大治理力度,减少线路重复停电次数。



(a) 线路重复停电次数和时长分析



(b) 线路重复停电条数分析

图 4 某市线路重复停电次数分布

3.3.2 台区重复停电分析

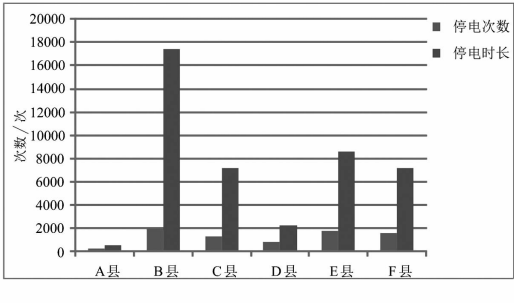
对该地区各个区域台区的重复停电情况进行分析。定义展示时间范围同上,统计区域在定义时间范围内停电、重复停电的次数和时长。统计各个区域在定义时间内台区重复停电的次数分布情况如图 5 所示。

据图 5(a)可知,该地区各市各台区总停电次数为 7 728 次,停电时长为 42 700 h。其中 B 县台区停电次数最多。据图 5(b)可知,停电 2 次的台区有 961 个、3 次的有 252 个、4 次的有 8 个、4 次的有 3 个、大于 5 次的基本没有。台区重复停电情况比线路重复停电稍好。出现 2 至 3 次重复停电的台区居多。

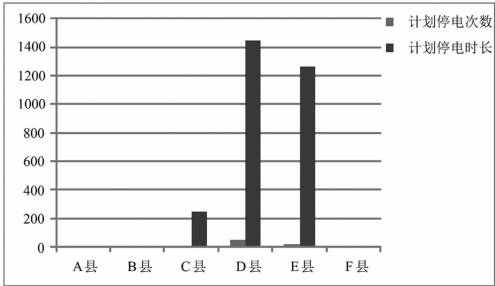
3.4 计划停电分析

停电类型分为:计划停电、故障停电、临时停电。其中故障停电、临时停电均属于非计划停电。

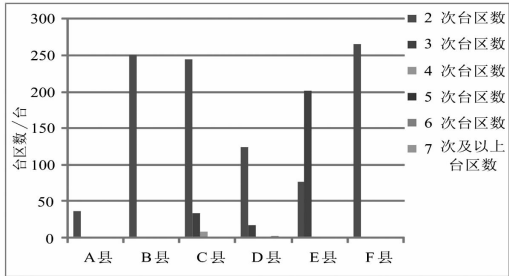
根据大数据处理,对该市计划停电数据进行分析,对该市 2016 年 5 月的计划停电情况进行展示,



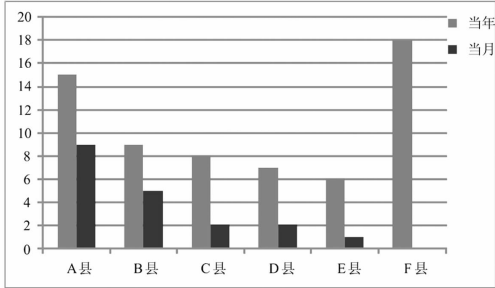
(a) 台区重复停电次数和时长分析



(a) 某市各县计划停电次数及时长分析



(b) 台区重复停电次数



(b) 计划停电线路中重复停电线路分布

图5 某市台区重复停电次数分布

结果如图6。据图6(a)可知,C、D县供电公司的计划停电次数较多。对该地区全年计划停电中重复停电线路进行分析,如图6(b)共有67条线路发生重复停电,其中7次及以上的线路占比最高,与前面分析的总线路重复停电次数相比,计划停电中的线路重复停电次数大大减小,可见重复停电次数大部分由非计划停电引起。

另外所设计系统还对该市计划停电的时段进行了统计,结果如图6(c)所示,该图表明计划停电时间大部分集中在7:00至18:00,这应该是从人民的安全、方便性上考虑到晚上的用电需求比白天更大。

3.5 优质服务

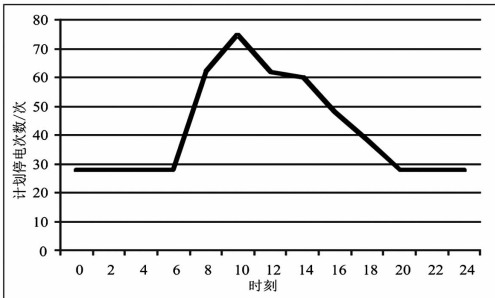
3.5.1 配抢效率分析

所设计系统可对配电抢修效率进行详细分析和展示,如图7所示。数据统计起始时间为2017年1月1日至2017年10月24日,总体上停电延时比供电延时次数多,并且停电延时的时长大于6h的次数最多。

从检修类型统计圆饼图可知,计划检修占比最高,故障检修占比相对较小,但是仍然说明有一定数目的故障发生。该图在帮助运行人员了解检修情况的同时,提醒检修方关注故障检修、非计划检修等情况,对故障线路进行考察,减少故障发生概率。

3.5.2 停电经济损失预估

供电可靠性降低不仅对用户造成极大损失,也



(c) 计划停电次数的时刻分布图

图6 某市各县计划停电分布情况

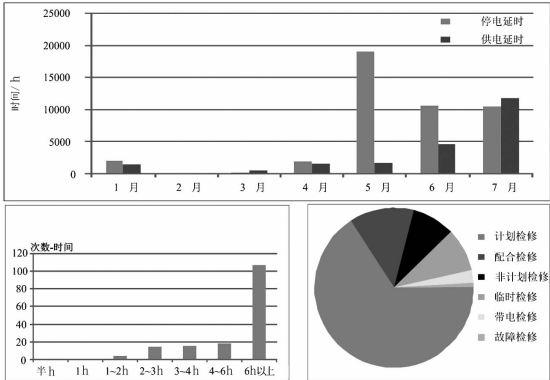


图7 配抢效率分析情况

会对电力公司造成损失,所以系统针对于台区重复停电的情况,对每个时间段内重复停电对电力公司造成的损失进行了预测、计算。通过台区停电事件对台区96个点进行数据拟合,计算出台区每个时间点的负载预测,对台区反复停电损失进行合理估算。

结果如图8所示(图中是某公司某周的停电损失金额,损失金额为90.56万元)。



图8 损失金额估算

在安排停电时,电力公司需要对停电的损失进行评估,所以系统提供给了电力企业一个科学、量化的评估依据。如图9所示,通过用户选择线路、停电时间段,通过后台大数据分析预测,得出停电损失额度。

选择线路

A线

停电时间

09-02 09:00

09-02 16:00

确定

根据计算预测,A线路在09月02日09时至09月02日16时停电,将会造成本公司8.36万元的直接经济损失。

图9 计划停电损失金额

4 结 语

研究开发了一套基于大数据的中压供电可靠性管理系统,系统分析结果表明:

- 1)该系统通过后台大数据分析预测,有效提高了台区停电事件可信度,并可得出停电损失额度。
- 2)该系统的停电研判方案是根据电力用户采集系统、OMS系统、PMS系统、变电站10 kV线路总表等数据对停电的可信度进行分析研判,提高了停电研判的正确度。
- 3)该系统处理可得到既定地区内的城网供电可靠性高达99.91%;可得到该地区线路重复停电情况、台区重复停电情况;可实现对计划停电分布情况的分析;可提供配抢效率分析、停电损失估计等优质服务。

系统分析结果可以为运行人员提供参考,对故障停电多发地区进行核实,采取相应措施以提高供电可靠率。

参考文献

[1] 于海平. 基于数据挖掘技术的运营监控系统[J]. 电气技术, 2016, 17(9):147-149.

[2] 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.

[3] 刘峰. 大数据分析在配电网统计数据中的应用探索[D]. 广州:华南理工大学, 2016.

[4] 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.

[5] 杜明建. 大数据技术在负荷预测与负荷特性分析中的应用[D]. 南京:东南大学, 2015.

[6] 孙立华, 胡牧, 孟庆强, 等. 配网线损大数据高性能计算解决方案[J]. 计算机与现代化, 2016(12):42-46.

[7] Qiu R, Antonik P. Big Data and Smart Grid: A Random Matrix[M]. John Wiley and Sons, 2014:33-60.

[8] 夏友斌, 俞鹏, 苏志朋. 基于数据中心的配网故障研判方案[J]. 科技经济导刊, 2016(7):39.

[9] Oracle Utilities. Utilities and Big Data: A Seismic Shift is Beginning[R]. An Oracle Utilities White Paper.

[10] 张东霞, 苗新, 刘丽平, 等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015(1):2-12.

[11] 康春红, 谢育新. 供电可靠性实时计算及预控管理系统的开发与应用[J]. 广西电力, 2011, 34(5):57-59.

[12] Wu Xindong, Zhu Xingquan, Wu Gongqing, et al. Data-mining with Big Data[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2014, 26(1):97-107.

作者简介:
陈善兵(1969), 硕士研究生、高级工程师, 主要研究方向为电力工程技术;
赵 静(1981), 研究生、高级工程师, 主要研究方向为可靠性管理及质量监督。

(收稿日期:2017-11-10)

欢迎订阅《四川电力技术》

服务城区发展的主动式配电网规划管理

吴怀波,陈 飞,任志莲,陈 洋,孙 磊,许 涛,操丹丹
(国网黄山供电公司,安徽 黄山 245000)

摘要:在国家电网公司“大规划”体系建设大背景下,以黄山市城区配电网规划为研究基础,深入分析配电网规划、管理方面存在的问题,提出市政/电网相互衔接、服务城区发展的主动式配电网规划管理理念。基于“网格化”配电网精准规划方法,建立了目标、组织、策略三维度体系的主动式规划管理机制,高效优质进行配电网规划。最后通过实施成效,验证该规划管理体系的创新性、准确性和有效性。

关键词:配电网;规划;管理体系;网格化

中图分类号:TM715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2018)01-0089-06

Active Distribution Network Planning Management Serving Development of Urban Areas

Wu Huaibo, Chen Fei, Ren Zhilian, Chen Yang, Sun Lei, Xu Tao, Cao Dandan
(State Grid Huangshan Electric Power Supply Company, Huangshan 245000, Anhui, China)

Abstract:Under the background of "big planning" system by State Grid Corporation of China, and based on the urban distribution network planning of Huangshan city, the problems existing in distribution network planning management are analyzed, and the ideas of active distribution network planning management is proposed for the interconnection of municipal/power grid and serving the development of urban areas. Based on the precise "gridding" planning method of distribution network, the active planning management mechanism of three - dimension system with target, organization and strategy is established, which can carry out distribution network planning with high efficiency and high quality. Finally, the innovation, accuracy and effectiveness of the proposed planning management system is verified by the results of implementation.

Key words:distribution network; planning; management system; gridding

0 引言

“主动式”配电网规划管理是指以超前意识服务城区发展用电需求为出发点,以建设城区“一流配电网”为目标,主动转变配电网规划管理的工作思路,制定配电网规划管理目标体系。对外主动对接城区建设规划部门,使配电网规划更好地适应城区发展建设;主动掌握城区网格内不同负荷分布,解决季节性用电高峰难题,服务清洁能源接入和配电自动化发展需求。对内主动建立健全内部规划管理的组织体系和策略体系,优化管理业务水平,提高配电网规划质量,最终形成以“主动式规划管理,网格化规划布局”的现代黄山城区配电网,从而为服务

城市发展建设提供有力保障,为服务地区经济发展提供强力支撑。

1 配电网规划管理存在的问题^[1]

电网发展一直存在“重主轻配”问题,黄山市配电网基础薄弱,随着城市行政区域拓展后的需求及分布式电源、电动汽车的快速发展,配电网的功能、形态以及发展环境均发生了巨大变化,老问题和新需求相互交织增加了城区配电网发展难度。

1) 电网规划发展时间短、制约多,远景目标网架的规划没有市政建设变化快。配电网规划约束力较差,没有形成统一的管理体系,规划质量和效率低下。

2) 配电网规划与用户需求衔接不足,存在规划

依据不实、负荷预测不细、项目储备不深等问题。

3) 由于配电网网架变化快、线路转接频繁,造成对配电网现状分析不透彻,不能如实反映配电网存在问题;配电网规划设计建设标准不统一,差异化大;规划前后缺乏重要指标对比,不能为投资决策提供可信依据。

2 主动式配电网规划管理体系的构建

2.1 立足公司责任,建立主动式规划管理目标体系

1) 服务政府规划建设部门,制定多项规划成果对接机制

由于城区配电网规划与城区总体规划、详细规划和综合管廊等规划之间是互为影响、相互指导、密不可分的关系,因此为了使配电网规划更好地服务于城区发展建设,促进配电网规划项目的有效落地,黄山供电公司制定了长期规划对接机制(图1),主动与黄山市(区)政府、规划部、住建委等多个政府部门,以及水利、燃气、通信等多个相关单位进行规划对接,将各规划成果有机结合,保障城区配电网规划储备项目有序开展落实,实现“多规合一”。

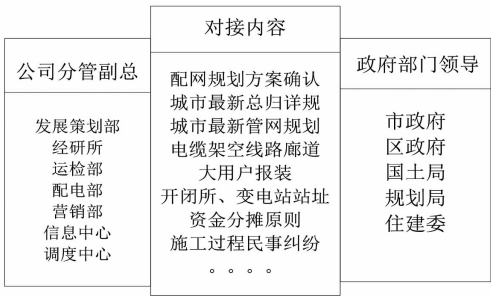


图1 主动规划对接内容

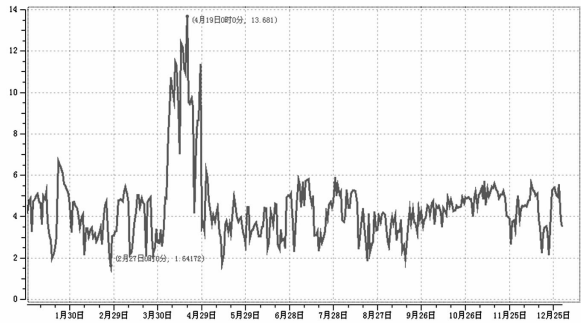
采用网格化规划理念,基于网格划分“两分法”,精细划分高、中压供电网格,制定中压配电网目标网架和过渡方案,将网格化推广到了开闭所和低压配电网,在低压网格内推行低压侧分相管理,有效提升城区各级配电网的供电能力,有效改善现有配电网存在的供电范围重叠、线路迂回、线路跨江等问题。根据配电网网格化规划成果,黄山供电公司主动向相关政府部门提交了规划变电站、开闭所、环网单元的站址和电缆廊道需求,争取把配电网专项规划早日提上规委会日程,获得政府提供的专项规划批复,将规划变电站、高压线路廊道等纳入城区控制性详细规划和综合管廊规划,将开闭所、配电房等纳入城区地块修建性详细规划。对于与政府或企业

共建部分,制定相关共建协议,明确如开闭所土建、电缆廊道等投资资金的分摊比例。

主动对接机制既有利于政府规划部门提前对城区公用资源进行合理规划使用,又有利于配电网专项规划项目的有效落地,避免重复建设,节约项目投资。

2) 服务季节性用电需求,制定季节性用电网格台区建设模式

黄山地处皖南山区,是世界著名的国际性旅游城市,亦是十大名茶“黄山毛峰”和“太平猴魁”的主产地。城区配电网负荷以工业居民用电、旅游服务性商业用电和茶季用电为主。每年茶叶加工时间主要集中在4~5月,与近3年城区制茶集中区域用电年负荷曲线图(图2)中该时段负荷要高于其他时段负荷的实际相符。茶季用电负荷高峰多发生在上午10:00过后至次日凌晨5:00~6:00并依次循环,中间仅3~4h的间隙,对应日负荷曲线图(图3),因此茶季制茶用电均属于典型的季节性用电。通过负荷曲线可以直观地看出茶区负荷季节性的特点,一年中茶季负荷大,持续时间较短,其他时段负荷小,持续时间较长,茶季负荷约为平时负荷的两倍,负荷差异显著。



茶叶加工设备多以电烘箱、电炒锅、杀青机等机械为主,其中电烘箱额定功率约2.5 kW、电炒锅额定功率约1.5 kW、杀青机额定功率约3 kW。茶叶加工季节,制茶用户基本开动全部加工设备,用电同时率较高,因此,每户总额定功率将不低于7 kW。

由于茶叶加工设备功率大、能耗高,导致制茶区域内台区配电变压器出口电压降低、电流增大的情况,容易导致保护装置跳闸频繁、JP 柜过负荷烧坏等问题。同时为茶区供电的 10 kV 供电线路设备在茶季内长时间处于满载、过载状态,导致线路设备损耗大,故障率上升。

为了更好地服务城区用户的各类用电需求,缓解季节性高峰负荷影响,结合网格化配网规划,划分出茶季制茶用电网格区域,针对网格内台区制定了季节性茶区台区供电模式——“1 + X”配电变压器模式,即在非茶季时段采用一台适当容量的配电变压器供电满足日常用电,茶季期间采用多台配电变压器分区供电满足茶叶生产用电和生活用电需求。避免单一配电变压器在季节性高峰负荷期间超载、其他时段轻载的问题,有效解决季节性高峰时段低电压问题。

3)服务清洁能源接入需求,预留并网和电源接口

随着全社会节能减排政策的不断深入推进,构建绿色低碳电网已成为未来城市配电网的发展方向。截止到 2016 年,国家共出台新能源汽车相关政策 30 余项,其中推广政策 7 项,充电基础设施政策 4 项;关于光伏发电也相应出台了多项推广政策和补贴政策。黄山作为国际性旅游城市,一直致力于构建低碳电网。黄山城区没有火力发电场,只有小水电和光伏发电。近年来,在国家各项政策的推动下,黄山城区光伏、小水电和垃圾发电等清洁能源和电动汽车充电桩均得到快速发展。

为了更好地服务清洁能源接入配电网系统和满足多元负荷的用电需求,结合配电网网格划分,主动掌握清洁能源报装计划,充分评估清洁能源的就地消纳能力,结合不同网格区域的发展定位,满足各网格内分布式电源的并网需求。通过新增开闭所布点解决目前城区变电站 10 kV 用电间隔紧张但线路负载率不高的问题,同时增加了 10 kV 出线间隔,优化了网格结构,结合城市发展规划及远景报装计划,为城区分布式电源提供并网接口,为充电桩预留电源接口。而对于规划建设的垃圾发电、小水电等清洁能源项目,黄山公司积极开展项目可研及评审工作,合理制定接入系统方案,减少运行冲击,保障城区电网稳定性。

2.2 强化协同分工,建立主动式规划管理组织体系

1)强化内部协同管理,组建分层分级管理工作

组强化规划管理理念,积极建立分管领导组织领导下的分层分级的规划管理小组。分管领导为组长,发展部主任为副组长,经研所、营销部、配电运检部、调度信息中心主任为小组成员,以分管领导推动的方式展开对公司规划管理体系建设的布控工作,进行总体筹划、组织和推进。通过每周例会、信息内网邮件平台、微信群等多种信息化手段,宣贯配电网规划管理的重要性,将配电网规划管理的工作目标、工作计划和管理措施,由上至下层层传递,实现内部规划管理体系的纵向管理。通过建立团队运作机制,成立规划管理工作小组,明确发展部为归口管理部门,落实其他各专业部门职责,具体责任落实到人,各专业部门抽调一名骨干作为工作小组成员,明确考核标准,实现内部规划管理体系的横向协同。

通过成立规划管理工作小组,实现各部门职责清晰,运作协同高效,达到规划环节过程精简、流程提速,从而高质量、高标准完成配电网规划前期准备、规划编制及规划成果对接和发布工作,保障规划工作高效执行和协调推进。

2)制定专家合作交流机制,提升规划管理水平

为了提高公司配电网规划管理水平,一方面积极与省电力公司和省经研院的领导专家进行学习交流,争取到省级规划专家的专业指导。另一方面积极到国内电网建设领先的浙江、江苏、福建等地进行实地调研,与当地的电网规划专家进行座谈交流,学习当地先进的配电网规划管理经验,并加强双向回访交流;与国内知名的天大求实公司进行规划管理业务合作,制定规划管理长期合作交流机制。由此建立起高水平的配电网规划管理咨询团队,有效指导黄山公司的规划管理体系建设。

3)统筹部门管理资源,建立人员技术培训机制

配电网规划涉及面广、专业性强、审核难度大,因此需要统筹各方力量,建立一支专业素质高、业务能力强的评审专家队伍,来保障配电网规划评审和规划项目储备工作的正常运转。统筹公司发展策划部、规划项目主管部门、经研所及相关合作单位等多方资源,参与配电网专项规划的评审工作和近中期过渡年规划项目的储备工作。

主动加强规划评审专业队伍培养,组织开展各部门技术人员业务培训、上挂学习和实习锻炼,如市(县)公司人员上挂省(市)公司学习锻炼,相关部门借调人员等。从而促进各专业人员打破专业壁垒相

互学习、取长补短,及时掌握最新管理要求,快速提升规划管理规划、前期、评审等业务水平,提高配电网规划、项目前期和项目投资环节的工作效率和质量,为配电网规划全过程管理提供坚强的人力资源保障。

4) 实行政企联合内外多层规划评审机制

为了全过程提高配电网规划成果质量,公司从配电网规划开展到完成,实行了政企联合内外多层规划评审机制。具体评审流程(图 4)包括:配电网规划初审-配电网规划内审-配电网规划政企联合评审-配电网规划上规委会评审。

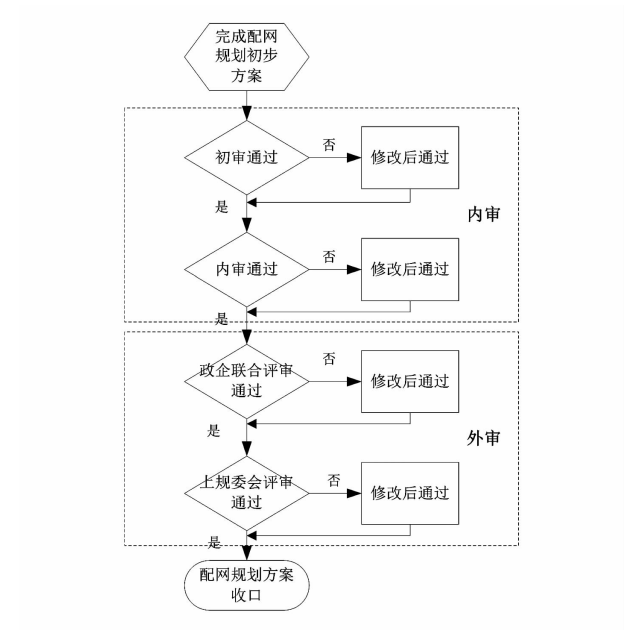


图 4 配网规划方案多层评审机制流程

一方面,由发展部牵头,组织公司经研所开展配电网规划方案初审,经初审修改通过后,联合营销部、配电运检部、信息调度中心等相关部门开展配电网规划方案的内审工作;另一方面,主动邀请黄山市政府、规划局和住建委等相关单位参与城区配电网规划评审,超前为城区配网规划开展提供政府支持和保障,以便配电网规划在与市政多部规划对接时做到无缝对接,便于规划储备项目可靠落地。在政府参审过程中,由各部门根据黄山地区实际提出初步规划方案中的“负面清单”。由于黄山为国际旅游城市,城区内有老街、花山迷窟等多处 5A 级核心区域和公园湿地,如配电网规划方案中有影响到城区重要景区的规划线路廊道或压矿项目,需要列入“负面清单”中,在接下来的规划方案修改调整中重新考虑,从而更好地服务城市景区美观和城市用电需要。

2.3 基于网格化规划,建立主动式规划管理体系

城区配电网网格化规划管理,遵循“做实、做细、做深”的理念,按照“自下而上”的方式,将规划管理重点放在中压电网规划范围并延伸至低压电网,采用“前期数据精准化,负荷预测单元化、目标网架模块化、规划管理网格化、规划标准规范化、指标分析数据化”的“六化”规划管理策略。

1) 前期数据精准化

城区配电网规划的开展建立在现有配电网基础数据收集之上,通过电网诊断找出配电网存在的薄弱环节,根据现有网架与目标网架的差距,制定过渡年配电网项目储备,估算项目建设需要投入的资金以及评价产出的效果。

由发展策划部牵头,由市经研所提供统一的基础资料模板和技术表格,由营销部、配电部、运检部、调度中心和信通公司提供相关基础信息台账和电网运行方式,由经研所统一开展基础资料的汇总、审核及基础图纸的绘制工作,实现基础数据“表格化、图形化”。图、表内容严格要求一一对应,同时精确设备在图中位置,力争实现“坐标化”,保证配电网基础资料“有表可循,有图可查”。

利用各种信息系统收集的基础数据对各部门提供的基础台账进行对比分析,如同一基础数据的两种统计结果相差较大的话,则由经研所与相关部门到现场进行核对,实现基础数据“核实化”,保证数据收集的高准确率。基础资料收集完毕后形成统一的配电网基础数据库,实现“统一化”,由于配电网新建、改造和技改大修的项目多,运行方式变化导致线路切改等,需要对基础数据库定期进行滚动维护,保证配电网基础数据的准确性和时效性。

2) 负荷预测单元化

为了提高负荷预测的准确性,黄山公司提高按照单一功能最小化的原则,对城区地块进行了更为细致的划分,即按照街块以及用地性质划分出 1 320 个用地小区并进行预测,主动结合城市详细规划和分布式电源等新能源接入需求,网格内采用空间负荷预测与大用户报装相结合的预测方法,每个用地小区中只包含一种性质的用地,并对每个小区块进行编号,从而形成远景饱和“负荷词典”,便于网格内饱和负荷的计算(表 1)。同时,“负荷词典”的成果能够为政府规划部门开展市政规划建设提供依据,明确不同地块饱和负荷边界,合理进行规划布局。

表 1 中心城区用地细致划分负荷举例

编号	用地性质	建筑面积 /m ²	负荷 /kW	编号	用地性质	建筑面积 /m ²	负荷 /kW	编号	用地性质	建筑面积 /m ²	负荷 /kW
A001	居住用地	43 141	932	A101	医疗用地	5 463	132	...	...	...	...
A002	居住用地	82 843	1 789	A102	公服用地	5 347	128	A223	商业用地	18 305	1 025
A003	居住用地	55 701	1 671	A103	行政办公用地	12 500	375	A224	商业用地	9 440	529
A004	居住用地	59 984	1 296	A104	医疗用地	11 955	430	A225	商居混合用地	10 583	593
A005	居住用地	30 163	652	A105	教育用地	5 340	160	A226	商居混合用地	8 728	469
...	...	...	...	A106	行政办公用地	6 303	189	A227	商业用地	18 591	1 040

3) 目标网架模块化

电网网架决定着电网供电可靠性的最终水平,灵活的负荷转移能力是减少计划停电的关键途径。参考国内外先进配电网网架建设经验,结合黄山发展定位和地区环境特点:①黄山作为国际性旅游城市,不推荐架空组网,结合城市综合管廊建设,逐渐采用电缆组网。②城区变电站剩余间隔紧张,但线路负载率不高,若采用开闭所组网,能有效解决间隔不足问题,同时为网格内分布式电源规划提供并网接口,为充电桩预留电源接口。③城区气候潮湿,雷雨天气较多,室外环网柜故障率偏高,开闭所受潮湿影响不大,可靠性高;开闭所为徽派建筑风格,不影响城市美观。配合政府综合管廊建设,城区配电网采用以开闭所组网的电缆“双环网”为主,架空线多分段适度联络为辅的目标网架。

采用双环网组网(图 5),在邻近环网节点间均有联络,灵活的负荷转移能力非常强,供电可靠性非常高,满足远景规划目标的要求。为保证双环网主干线容量裕度,一组双环网最多串 3 组一级开闭所。通过模块化目标网架接线模式,便于推广应用到其他直供区和县公司配电网规划中。

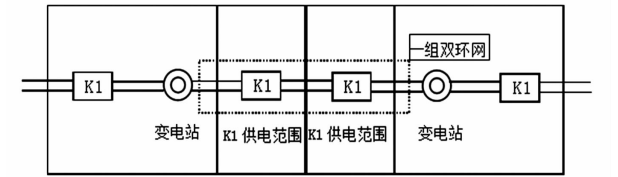


图 5 中压配电网以开闭所组网的“双环网”目标网架

4) 规划管理网格化

①配电网规划网格化,形成三级网格规划体系^[2]

高压网格化:加强主网与配电网规划的衔接,以高压变电站为中心划分高压网格,满足中压网格对高压电源点、变电容量、10 kV 间隔等需求。

中压网格化:以最新城区总体规划、详细规划及

远景负荷预测为基础,划分独立中压网格,制定目标网架,划分开闭所网格,模块化开闭所出线方式。

低压网格化:以台区为基本单元,划分低压网格和用电单元,推行低压分相管理,均衡三相接线,降低低压线损。

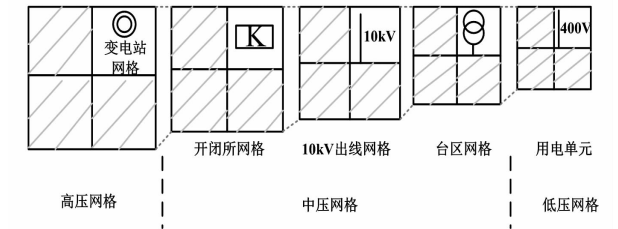


图 6 配电网三级网格化规划体系

②配电网管理网格化,建立“三级管理”模式

为了更好地对配电网格进行管理,建立“三级管理”的网格管理模式,即领导管面,总体负责,统筹指导;营销、配电、运检等各部门主任管线,督导协调,“网格用电服务联络员”管片,具体落实。通过对供电网格进行三级管理,实现“人员、职责、任务”三落实,从而建立起“一网多格,一格多员,按格定岗、责任捆绑”的网格化管理格局,将网格细分,确认责任人,层层分解管理责任。

每个网格片区所属的网格用电服务联络员由相关的经研所人员、营销人员、配电运维人员组成,形成一个网格工作小组。每个工作小组中的经研所人员负责网格规划的细节调整,营销人员负责统计处理各自网格内的用电接入需求,配电运维人员负责处理用电故障抢修。同时发展部、经研所等部门定期参与用电接入需求的业扩会议,结合网格化规划,合理选择接入方案。

③配电网抢修网格化,提高抢修服务水平

为了更好地提高公司供电抢修服务水平,缩短配电网故障停电时间,制定《黄山供电公司网格化抢修驻点值班管理办法》,城区网格化抢修驻点分 3

个区域,分别为中心城区、经济开发区和配电本部,各驻点抢修半径不超过3 km。制定了《黄山供电公司网格化抢修驻点工作质量考核细则》,严格控制抢修时间,缩短恢复供电的时间,保障供电服务质量,提高网格内配电网的供电可靠性。

5) 规划标准规范化

积极整合优化国网已有的配电网规划设计的标准化成果,结合黄山配电网实际和发展目标,制定了《黄山市直供区配电网规划设计技术导则》,为城区配电网规划设计提供参考标准。同时规范配电网建设技术标准,全面推广国网最新的典型化、模块化和通用化设计;规范化、系列化设备选型,落实通用设备“四统一”,开展标准化配电网建设。为了从源头把控配电网建设标准,提高配电网建设质量,黄山公司出台了《黄山市35 kV线路工程可行性研究评审细则》《黄山市35 kV变电站工程可行性研究评审细则》《黄山市10 kV开闭所工程可行性研究评审细则》和《黄山市10 kV线路及台区可行性研究评审细则》等相关规划储备项目的可研评审细则,如城区内线损示范台区项目可研中推广在低压网格内采用分相接线管理方式,保障三相负荷动态均衡,有效降低台区低压侧线损,将线损率控制在4%以内。目前该低压侧管理模式已在其他区县公司成功推广应用。

6) 指标分析数据化

积极开展规划执行后效果量化评估工作,建立评价指标体系和考核工作机制,实施常态化管理。主要从电网N-1通过率、容载比、城市用户供电可靠率、城市综合供电电压合格率、同期线损合格率、规划项目准确率、可研计划执行率等指标进行考核。开展规划效果“回头看”工作,常态化检查配电网规划是否体现电网和公司发展方向,规划重点是否抓住电网和公司发展关键,规划进程是否适应电网和公司发展形势变化,规划项目安排是否满足城市发展建设的需要,安全稳定性是否满足“大检修”、“大运行”的需要,用电服务是否满足“大营销”的需要,真正做到以电网和公司发展的实际来回头看规划成效,滚动修编完善黄山地区配电网规划,形成“电网规划—规划前期—投资计划—实施及后评估”的闭环管理体系。

3 实施效果

3.1 规划管理水平提升

1) 通过开展“主动式”规划管理体系的建设,黄山供电公司规划管理水平大幅提升,规划全过程环节精简、流程提速、管控有力,提升了规划效率和投资效率,从而加快对黄山城区现代配电网的网架、装备、自动化等的建设改造,配电网规划跟上城区快速建设的脚步,有力保障城区用户可靠用电。

2) 黄山公司配电网供电可靠性、综合电压合格率、N-1通过率等专项指标得到显著提高,规划管理指标如“规划项目准确率”、“项目可研、核准质量及完成率”、“项目储备及综合计划执行情况”、“电网规划专项管理”等均有效提升。

3.2 供电可靠性和服务水平优化

1) 通过科学优化配电网规划和管理,城区配电网供电可靠率得到显著提高,通过目标和过渡网架规划,进一步指导配电网项目规划储备,开展规划方案技术经济比较,优化电网投资。

2) 公司主动加强与政府部门常态对接,电网规划逐步纳入地方详规,提高电网工程与政府工程同期建设率,减少对居民生活环境的影响,提高客户满意度和电力企业的社会形象。通过分层网格化规划管理,提高供电服务主动性,便于各类用户有序接入系统。

3) 有效提高茶季用电的季节性供电服务质量,网格化抢修减少故障停电时间,提高供电服务水平,减少用户投诉。

4) 统筹考虑分布式电源和多元负荷的接入需求,加强对其接入位置和规模的引导和管理,提前规划配套工程,满足接入需求。

3.3 助于城市景观,促进旅游发展

结合政府城区管廊规划,黄山供电公司采用网格化规划管理,避免线路跨江供电;采用徽派风格开闭所,与城市风格相协调;采用电缆组网,减少城区主要道路和景区上空的架空线路,有助于城区和景区的美观,带动地区旅游发展。

参考文献

[1] 刘国平,王聪,赵杰. 基于服务城市行政区域拓展的高效配电网规划管理体系研究[J]. 河北电力技术, 2016,35(1):1-3.

[2] 罗井利. 龙华新区低压配电网供电能力现状分析及对策研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.

作者简介:

吴怀波(1985),硕士研究生,研究方向为配电网规划及评审。

(收稿日期:2017-09-15)