

现代电力系统恢复控制研究综述

刘 强^{1,2}, 石立宝², 周 明¹, 李庚银¹, 倪以信^{2,3}

(1. 华北电力大学 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 清华大学 深圳研究生院 电力系统国家重点实验室深圳研究室, 广东 深圳 518055;

3. 香港大学 电机电子工程系, 香港)

摘要: 综述了现代电力系统恢复控制的任务、主要问题以及解决方法。从宏观角度将恢复控制划分为恢复计划和恢复培训、有功平衡与频率控制、无功平衡与电压控制和继电保护以及安全自动装置的配合 4 个主要问题。恢复计划的制定是一个复杂的优化问题, 一般可离线预计划, 并采用人工智能技术和最优化方法相结合, 予以解决。对于有功平衡与频率控制问题, 要考虑电源恢复和负荷恢复 2 个方面。电源恢复是一个动态规划问题, 要求在满足各种约束条件下, 使系统的发电量最大; 而负荷恢复目前是研究热点, 其要求和电源恢复同步进行, 满足频率约束、网络约束并考虑社会经济效益。主要方法有遗传算法、蚁群算法以及一些近似算法。对于无功平衡与电压控制问题, 综述了持续工频过电压、操作过电压和谐波过电压的产生原因、控制手段以及目前的预测和控制方法, 主要包括基于灵敏度分析、概率统计以及神经网络的方法。最后, 综述了系统恢复不同阶段中继电保护以及安全自动装置的配合的主要问题和处理方法。

关键词: 电力系统; 恢复控制; 人工智能技术; 有功频率控制; 无功电压控制

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)11-0104-07

0 引言

现代电力系统为取得更大的安全和经济效益而趋于互联。大规模互联电力系统的优质运行和控制具有一系列新的特点, 特别是在电力市场环境, 系统潮流的不确定性, 以及局部系统或联络线可能在接近系统稳定极限处运行等, 易在级联故障条件下引起大停电事故, 造成巨大经济损失。近年来大规模停电事故, 如美加大停电、意大利大停电、瑞典丹麦大停电、英国伦敦大停电、俄罗斯大停电以及国内的海南全网停电等^[1-3], 即为例证。与此同时, 在事故发生后, 如何尽快恢复供电以减少事故损失, 也成为电力系统研究的热点。应当指出, 大规模互联电力系统事故后可能具有停电时间长, 影响范围大的新特点, 为事故后系统的快速恢复提出了严峻的挑战^[4-6]。

电力系统恢复控制是指电力系统发生故障, 系统部分负荷停电甚至处于解列状态乃至全网停电后, 在尽量少的时间内, 最大限度地恢复系统至新的正常运行状态的控制过程^[7-11]。恢复控制在数学上可以被描述为一个多目标、多阶段、非线性、并带多个约束条件的组合优化问题。该过程难以建立准确的数学模型, 目前尚没有通用解法, 只有结合所研究领域的专门知识, 将智能方法和数值优化算法结合起来, 才有可能找到切实可行的解决办法^[12-14]。

由于事故本身的复杂性和多样性, 导致故障后电网的结构和运行工况存在极大的偶然性和随机性, 恢复控制所面临的问题也各不相同。但从宏观角度而言, 对于任何一个需要恢复的系统, 制订合理的恢复计划, 确定恢复策略是快速恢复的先决条件, 也是恢复控制研究面临的一个首要问题。由北美电力可靠性委员会(NERC)的统计显示, 在过去 10 年发生的 117 起电力系统事故中, 接近 50% 存在恢复方案制订不完善的问题; 约 10% 存在有功不平衡问题; 接近 20% 的存在无功不平衡问题; 约 13% 存在继电保护和安全自动装置的配合问题。因此, 对恢复控制的研究应大大加强, 以减少事故损失。同时在恢复过程中, 需要面对大量的正常运行时不经常出现的问题, 对这些问题的有效控制和处理, 将是确保恢复计划顺利进行的关键, 应予以深入研究。

上述事实表明, 现代电力系统恢复控制面临的主要问题包括^[15-17]:

- a. 恢复计划和恢复培训;
- b. 有功平衡与频率控制;
- c. 无功平衡与电压控制;
- d. 继电保护以及安全自动装置的配合。

现对这几个主要问题进行分析, 介绍传统的控制手段、解决方法, 并着重总结目前该研究领域的新思路、新方法和新进展。

1 恢复计划和恢复培训

1.1 恢复计划

恢复控制的目的是将非正常的电网运行状态逐

收稿日期: 2006-11-27; 修回日期: 2007-03-17

基金项目: 国家重点基础研究专项经费项目(2004CB217900);

国家自然科学基金项目(50337010)

步恢复至新的正常运行状态,其过程要求非常细致的计划。目前,电力部门在处理大停电时仍以离线制定的恢复方案为主^[9-11,18-21],但离线恢复方案不一定适合大停电事故后的具体情况,原定的恢复措施也可能因为设备损坏等原因而无法实施。因此,如何针对故障后的电网结构和运行工况,制订切实可行的恢复计划是目前该研究领域的主要方向。

电力系统的恢复过程是在满足多种约束条件下逐步进行的,用 X 表示系统的状态,用 k 来表示阶段,用 D 表示要执行的操作,系统从初始状态 X_0 ,只能是一步一步地恢复到正常状态 X_n ,在第 k 个阶段执行相应的操作 D_k ,使系统达到相应的状态 X_k 。整个恢复过程的操作形成一个决策序列,称为策略,即:

$$D = \{D_1, D_2, \dots, D_k, \dots, D_n\} \quad (1)$$

整个恢复过程可以表示为

$$\begin{aligned} X_0 &= X_s = \{\text{初始值}\} \\ X_1 &= D_1 X_0 \\ &\vdots \\ X_k &= D_k X_{k-1} \\ &\vdots \\ X_n &= D_n X_{n-1} \end{aligned} \quad (2)$$

恢复计划的制订必须充分、全面地考虑所研究的电力系统的特性。整体上包括:系统的装机容量、负荷水平以及系统规模,供电区域的类型,供电系统的组成结构类别,输电网的电压等级,负荷种类和规模,电压调整策略,发电机组的冷启动特性以及重启动约束等。

由此不难看出,恢复计划的制订是一个多约束条件下的组合寻优过程,故障后的电网结构和运行工况的偶然性和随机性更增加了问题的求解难度^[22-23]。迄今为止,大多数恢复计划还是在反复试验的基础上制订的,缺少对恢复过程的量化指导和系统分析^[20-21]。因此,恢复计划的制订一直是恢复控制研究的重点。目前常见的方法包括人工方式、预案方式以及计算机辅助的智能方式。近年来,对于前 2 种方式的研究主要是针对恢复计划进行有效性评估。文献[24]提出了一种基于频域分析的方法,能够比较快速的评估恢复策略的合理性,并可给出相应的推荐步骤。文献[25]采用数据包络分析方法进行恢复方案的有效性评估,将技术校验结果纳入评估体系,并利用实际输入、输出指标值进行判定,使评估更加全面、客观。但是,该系统在算法上没有进一步优化,进行大电网的恢复计划评估时,运算速度是一个制约因素。

随着智能技术的不断发展,利用智能方式实现恢复计划的制订成为研究的重点,成果较多。文献[26]将案例推理的方法应用到恢复控制的研究中,取得了不错的效果。在这个系统中,用户可以方便地对知识库进行修改或添加。文献[27]采用专家知识库的方法,将知识库根据处理问题的不同进行划分,从而可以将一个多维问题求解简化成多个小问题的协同求解。文献[28]提出了一种基于规则库的恢复

控制专家系统。文献[29]将遗传算法与专家系统相结合,提出了一种能够灵活制订恢复策略的新方法。文献[30]提出了基于分层案例推理的决策方法,更加适应目前多电压等级电网的恢复。文献[31]利用并行蚁群算法寻找可行解,并采用启发式方法进行微调,能够比较好的确定恢复路径,构建恢复策略。

虽然单一智能体或专家系统能够比较合理的制订恢复计划,但方法的局限性决定其并不能很好的适应恢复控制中多目标、多变量、多阶段的要求。近年来,多智能体系统 MAS(Multi-Agent System)成为分布式人工智能领域的研究热点。MAS 技术可以克服原先多个系统之间各成体系、相互之间信息交互不足等造成的效率不高、整体决策依据出现偏差,甚至决策错误等诸多问题。利用 MAS 技术,针对恢复控制中多目标、多变量、多阶段的要求,设计功能相对单一的多个智能体解决对应的各个问题,通过各个智能体之间的协作,协同完成恢复计划的制订。其技术关键是如何设计单一智能体的功能和多智能体的结构。一个好的系统结构能够很好地平衡单一智能体内部功能的独立性与多个智能体之间协作的可靠性。目前,国内外已经提出了多种基于 MAS 技术的恢复系统,其结构也不尽相同,如 2 层结构、3 层结构、4 层结构等^[32-36]。其中,文献[36]还将 MAS 技术与蚁群算法结合,提高了系统的鲁棒性。但是,目前的系统还存在一些不足之处,主要表现在:单一智能体的任务过于复杂,不能充分体现 MAS 技术的优势;数据交互效率低,易造成传输延时;整个系统过于庞大,系统配置不易实现;通用性不强,不能很好的满足灵活性的要求,没有自适应能力等。

1.2 恢复培训

恢复过程中,电网的结构和运行工况与正常运行时大不相同^[37],此时各种数据、信息以及报警信号涌入调度中心,EMS 等辅助工具已经不能很好地适应当前操作的要求。调度员必须在一种非常紧急的状态下作出准确判断,采取正确操作,这对调度员提出了很高的要求。而这种情况在日常调度中很少遇到,因此必须对调度员进行系统恢复的相关培训。

经典的恢复培训是一个针对实际案例进行分析,确定恢复方案,进而评估效果,总结经验的反复过程。国外这方面的研究始于 20 世纪 70 年代,早期的系统主要利用普通 DTS 与专家的恢复经验相结合的方式^[38]。但是,由于目标不同,以及可获得的信息也不同,恢复状态的系统模型与正常运行状态下的系统模型大不一样。正常运行的首要目标是保证电网的安全、可靠和经济运行。而系统恢复的主要目标是能够在尽量少的时间内恢复尽可能多的负荷,部分忽略经济性的要求。一些正常运行状态下被忽略的动态问题,在恢复过程中也需要认真考虑。这些客观情况决定,利用普通的 DTS 并不能很好地适应恢复培训的要求。为了进行有效的恢复培训,必须进行技术革新。

计算机技术的发展使恢复控制仿真培训系统的实现成为可能,近年来的几次大停电事故也使国内外对调度员的恢复培训更加重视。文献[39]提出了一种基于案例推理算法的恢复培训系统,并采用面向对象技术,设计实现了图形化的用户界面。文献[40]介绍了意大利电网独立运行商比较成功的恢复培训经验。文献[41]利用多智能体技术,对多区域互联电网的恢复培训进行研究,提出了有效的解决办法。目前,国内也开始对恢复培训系统的实现进行研究,取得了一定的成果^[42-43]。

2 有功平衡与频率控制

有功平衡与频率控制的关键是对电源和负荷的协同恢复。而恢复对负荷的供电是系统恢复的根本目的,也是贯穿整个恢复过程中的优化目标。在恢复过程中,每次恢复负荷的数量太少会延长恢复时间,太多则可能导致系统频率的降低甚至再次崩溃。可恢复的负荷大小,是由并网机组原动机的响应特性决定的。一般认为,允许同时恢复的最大负荷量不应使系统频率较接入前下降 0.5 Hz,国外则普遍认为负荷量不大于发电量的 5%^[7-8]。但是,这些经验性结论并不能适应现代电网恢复控制的实际要求,需要采用更加科学和准确的控制方法。

系统的恢复大致可以分为 3 个阶段:系统的黑启动、系统的重构与互联以及负荷恢复阶段。在不同阶段,有功与频率控制具有不同的控制目标、不同的约束条件,也有不同控制方式。下面,将分别针对这 3 个不同阶段进行详细介绍。

在黑启动阶段,控制目标主要是保证电源的稳定运行。为此,需要恢复该区域内的一部分负荷用于平衡系统的有功功率,可以在运行频率允许范围内少量增加负荷,同时确保系统能够承受突然的负荷变化导致的频率波动。因此,如何对原动机及其调速系统进行准确的建模,确定系统的频率响应是该阶段有功平衡与频率控制的基础。文献[44]介绍了恢复过程中原动机频率响应特性和备用容量特性,分别给出了燃气轮机、汽轮机和水轮机的频率响应的传递函数,并以此为基础,确定某一频率约束下,最大可恢复负荷量、最小备用容量以及备用容量在各机组的分配。鉴于水轮机在恢复过程中的重要地位,有关人士对此进行了深入研究。文献[45]针对恢复阶段的特性,提出了考虑水轮机各不同部分的线性模型,该模型能够在系统恢复阶段更详细和准确地计算系统的频率响应。正常运行条件下,阻尼系数对于调速系统而言,并不是关键因素。但在恢复过程中,它对调速器控制有着非常重要的影响。文献[46]给出了考虑阻尼系数的新模型及计算公式,通过仿真和现场测试改进模型并得到所需的控制信息。

在系统的重构与互联阶段,控制目标是减少各孤岛间的频率偏差。由于“系统频率”是指并网的所有

机组的频率,是系统的共同因子。所以当各子系统进行互联时,需要调整机组间的频率偏差在尽可能小的范围内,从而保证系统稳定和机组安全。这个阶段的控制手段主要有:机组的优化组合、负荷的配合恢复、系统的结构调整等。在进行有功与频率控制的同时,还需要考虑各孤岛无功功率的分布以及联络线恢复时的相角差问题,从而构成了一个组合优化问题,难于直接求解。目前,这方面的研究主要是如何将问题转化成可以求解的形式。文献[47]利用分层交互式方法,将恢复控制划分为适应、优化以及指导 3 个层次,利用不同层次的协作得到合理的控制策略。文献[48]则通过寻优策略的选取,使系统重构中的寻优问题均有多项式时间算法,但算法的实用化有待提高。

在负荷恢复阶段,控制目标是尽可能多、尽可能快地恢复负荷。约束条件主要是系统稳态频率、电压必须保持在系统允许范围内,线路潮流不越限,当大负荷投入时,系统频率的下降不会引起低频减载动作等。因此,负荷恢复问题是一个包含整数规划和线性规划的混合规划问题,并具有众多的安全稳定约束条件,直接求解十分困难。国内外对此做了大量的研究。文献[49]给出了一些负荷的物理模型,为进一步研究打下了基础。文献[50]利用遗传算法,确定全局最优的负荷恢复次序。文献[51]则利用蚁群算法确定系统不同区域的恢复顺序。但是,以上 2 种算法的可靠性需进一步提高。文献[52]将混合规划问题松弛为只考虑系统稳态频率约束的 0-1 规划问题。利用“扩展的潮流计算”求解系统的稳态频率,利用大规模“背包问题”(Knapsack Problem)的近似算法求解系统的最大可恢复负荷量,利用线性解偶最优潮流算法来消除系统越限,并利用松弛规划负荷处理不可行解。但是,该文没有充分考虑负荷特性的影响。文献[53]提出了一种利用准稳态分析来解决负荷恢复问题的新方法。另外,文献[54-55]介绍了利用抽水蓄能电站,进行有功负荷调整的自适应方法,该方法能较好适用于抽水蓄能电站容量占较大比重的系统,也可适应恢复初期系统孤岛内的有功平衡,但其在在大系统中的有效性有待证实。

3 无功平衡与电压控制

3.1 无功平衡

无功平衡是保证系统顺利恢复的必要条件。在恢复过程中,无功不平衡源于空充长距离输电线路、空充电缆、变压器的投入以及并联电抗器和电容器的投入等^[7-8,15-17]。无功不平衡可能导致持续工频过电压、操作过电压以及谐波过电压^[56]。平衡无功功率,控制上述 3 种过电压在允许范围内,是恢复控制的主要任务之一。无功平衡的研究基础是确定发电机的运行约束,文献[57]给出了发电机在恢复过程中的实际运行约束,并给出计算发电机实际发出无功能力的方法。为了更有效地控制无功平衡,文献

[58-59]提出了通过合理确定升压变压器或者辅助变压器分接头,改变吸收的无功量,从而控制无功输出的新方法。

3.2 持续工频过电压控制

在系统恢复初期,恢复高压架空线路或地下电缆时,由于这些空载或轻载线路充电电流的作用,使得该过程相当于在系统内突然引入了无功电源,此时如没有足够的负荷来平衡无功功率,将会发生系统范围内的电压升高,即持续工频过电压。持续工频过电压严重时将引发发电机自励磁和不可控制的电压上升,并可能进一步导致变压器过励磁、谐波畸变和谐波过电压的产生,甚至破坏避雷器和断路器等。

持续工频过电压的控制手段主要是通过吸收轻载线路所产生的大量无功功率,如确保发电机有足够的低励能力、连接滞后功率因数的负荷、投入并联电抗器、调节变压器分接头的位置等。

在恢复过程初期,通常希望尽可能多的恢复高压输电线路,以加快恢复进程。但是投入的输电线路过多,可能导致持续工频过电压的发生。因此,如何利用上述控制手段,确定有效的控制策略是系统恢复的关键。文献[60]给出了一种近似方法来估计持续过电压和暂态过电压的大小,并通过该估计值确定各条线路应投入的长度、发电机容量及线路两端应带的负荷。文献[61]采用灵敏度分析法确定一组最有效的过电压控制变量或扰动变量,并采用有效因子来综合考虑各控制变量的调节裕度,从而使所需的控制操作数量最小。

3.3 操作过电压控制

操作过电压是指在空充输电线路或操作容性设备时,断路器的开合操作导致电力系统从一种稳定工作状态振荡转变到另一种稳定工作状态的过渡过程中所产生的暂态性质的过电压。

操作过电压通常受到较大的阻尼,持续时间短,其大小取决于系统的结构、设备参数、断路器性能以及操作过程等。其中,设备参数在恢复过程中基本保持不变,而系统的结构和断路器的合闸时间是决定操作过电压大小的主要因素。普遍认为,操作过电压并不是恢复控制中需要着重考虑的主要约束,对于 110 kV 以下的系统,操作过电压可以忽略;对于 110 kV 以上的系统,如果在恢复过程中保证系统电压在正常运行电压的 1.2 倍以内,系统的避雷器就能比较有效地进行处理^[56]。在我国大力发展特高压电网的形式下,一些抑制操作过电压的新技术和新设备得以应用,例如:高压开关并联电阻、新型避雷器以及相位控制高压开关等^[62]。

因此,对于操作过电压的研究大都集中在如何对其进行快速、准确的预测和校验上。文献[63]采用数理统计的方法,针对恢复过程中空充输电线路引起的操作过电压问题,利用蒙特卡洛法建立操作过电压计算的概率模型;通过随机抽样给出开关操作信息,结合贝瑞隆输电线路模型,进行操作过电压的计

算校验。文献[64]提出利用神经网络快速预测操作过电压的方法,通过误差反传神经网络得到输入特征值与过电压的对应关系,实现操作过电压的快速预测。

3.3 谐波过电压控制

谐波过电压源于开关操作和设备的非线性特性。在系统重构阶段,电网结构比较薄弱,由充电电流引起的容性的电压上升会导致变压器的过励磁并产生严重的谐波。当系统阻抗与线路电容参数构成并联谐振条件时,轻载或空载变压器投入所引起的谐波畸变将被放大,从而产生很高的谐波过电压。大多数情况下,谐波过电压由持续工频过电压引发,但有时变压器没有持续过电压现象,由励磁涌流引起的谐波也可能导致谐波过电压,需要引起额外重视。在恢复阶段,系统的阻尼较小,谐波过电压严重时会引起继电保护动作,甚至造成设备损坏和系统故障,拖延恢复进程。

对谐波过电压的控制手段主要有:调节变压器分接头位置,控制变压器励磁涌流,增加系统短路容量或增加负荷,改善系统频率响应特性等。

文献[24]通过灵敏度分析确定能有效控制谐波过电压的网络结构,采用 Prony 方法和模糊集理论对谐波过电压进行估计,但由于 Prony 方法本质上是一种线性函数拟合的方法,因此系统在大扰动情况下的非线性必然对分析结果产生影响,且模糊集理论等人工智能方法也存在一定程度的不确定性。文献[65]通过频域分析与灵敏度分析相结合的方式,首先确定各次谐波阻抗的灵敏度,进而考虑各次谐波阻抗灵敏度的权重,得到总谐波阻抗的灵敏度。文献[66]对变压器励磁涌流的控制和系统频率响应特性的改善进行研究,运用灵敏度分析方法确定最有效改善系统频率响应特性的负荷位置,实现以最少的负荷投入量和控制操作数量对谐波过电压进行有效控制。采用文献[65]的模式,在灵敏度分析中引入权值来反映变压器励磁涌流各次谐波分量的影响,从而更精确地反映谐波过电压对系统负荷的灵敏度。

4 继电保护及安全自动装置的配合

恢复过程中,由于运行条件发生极大变化,保护和安全自动装置的动作特性也可能随之发生变化,导致部分装置会误动或者拒动,失去了原有的作用,甚至阻碍系统的恢复,严重时将导致系统再次崩溃。同时,不同恢复阶段对保护和安全自动装置的要求也不同,必须根据各个阶段的特点,针对可能出现的问题在保护和安全自动装置的设置和整定上做相应的处理,使其有利于恢复控制的实施^[67-69]。

在系统黑启动和各孤岛独立运行阶段,由于此时系统的总发电容量较小,频率和电压变化较大,控制困难。继电保护和安全自动装置面临的主要问题是低频减载、低压减载装置的配合,线路零序保护的整定,重合闸方式的确定以及线路电流保护的整定。

在系统互联和负荷恢复阶段,主要是同步装置的合闸相角的约束问题。系统能够承受的最大合闸相角差与系统的电压等级、运行工况以及合闸点有关。通常而言,500 kV 系统的保护整定值为 20° ,220 kV 系统为 40° ,110 kV 系统为 60° ^[70]。但在实际运行中,为了安全起见,经常需要控制相角差在 10° 以内。因此,在恢复过程中如何进行相角差控制也是一个比较重要的问题。文献[70-73]分别介绍了利用反复试验的方法、直接计算的方法、灵敏度因子的方法以及最优潮流的方法来解决相角差的控制问题。另外,在这个阶段,一些安全自动装置的投切也是一个比较重要的配合问题。

在整个恢复过程中,还必须密切注意发电机的保护,包括发电机励磁系统的保护、负序电流保护等。要维持发电机机端电压在允许的范围内,防止发电机的转子、定子过热。发电机励磁系统的保护装置一般有低励保护、失磁保护、最小励磁限制器、失步保护、过励磁保护等^[69,74-75]。应注意其与系统恢复控制的配合。

5 结论

现代电力系统在力求取得更大的安全和经济效益的同时,因其运行和控制的新特点,易在级联故障下引发大停电事故。事故发生后,如何采取有效的控制方法,尽快恢复供电、减少事故损失是现代电力系统恢复控制研究的主要任务。

恢复控制是一个多目标、多阶段、非线性、并带多个约束条件的组合优化问题,其主要问题包括恢复计划和恢复培训、有功平衡与频率控制、无功平衡与电压控制、继电保护以及安全自动装置的配合。从目前的研究情况看,智能技术、数值优化算法与传统控制方法的结合是解决恢复控制问题的主要手段。此外,交直流互联输电、电力电子设备应用、分布式发电以及广域测量等新技术的应用和控制理论、优化理论以及人工智能技术的发展将为恢复控制提供新的理论和方法^[5,76-78]。总而言之,现代电力系统恢复控制的研究还不成熟,但又十分重要,应予以进一步深入系统的研究。

参考文献:

- [1] ANDERSSON G, DONALEK P, FARMER R, et al. Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1922-1928.
- [2] 何大愚. 一年以后对美加“8.14”大停电事故的反思[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 1-5.
HE Da-yu. Rethinking over ‘8.14’ US-Canda blackout after one year[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 1-5.
- [3] PEREIRA L. Cascade to black [system blackouts][J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2004, 2(3): 54-57.
- [4] 王梅义, 吴竟昌, 蒙定中. 大电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [5] HOROWITZ S H, PHADKE A G. Boosting immunity to black-outs[J]. Power and Energy Magazine, 2003, 1(5): 47-53.
- [6] MAKAROV Y V, RESHETOV V I, STROEV A, et al. Blackout prevention in the united states, Europe, and Russia [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(11): 1942-1955.
- [7] ADIBI M M, CLELLAND P, FINK L, et al. Power system restoration—A task force report[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(2): 271-277.
- [8] ADIBI M M, BORKOSKI J N, KAFKA R J. Power System restoration—the second task force report[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(4): 927-933.
- [9] 房鑫炎, 郁惟镭, 熊惠敏, 等. 电力系统黑启动的研究[J]. 中国电力, 2000, 33(1): 40-43, 96.
FANG Xin-yan, YU Wei-yong, XIONG Hui-min, et al. Study on power system black start [J]. Electric Power, 2000, 33(1): 40-43, 96.
- [10] 周云海, 胡翔勇. 恢复控制的一般策略和实例分析[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2003, 25(5): 426-428.
ZHOU Yun-hai, HU Xiang-yong. General strategy of restoration control and case studies[J]. J of China Three Gorges Univ: Natural Science, 2003, 25(5): 426-428.
- [11] 刘隽, 李兴源, 许秀芳. 互联电网的黑启动策略及相关问题[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 93-97.
LIU Jun, LI Xing-yuan, XU Xiu-fang. Strategies and problems in black start of interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 93-97.
- [12] WU F F, MONICELLI A. Analytical tools for power system restoration—conceptual design[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(1): 10-16.
- [13] GIRI J, KIRSCHEN D S, SHAHIDEHPUR S M, et al. New approach in power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(4): 1428-1434.
- [14] ADIBI M M, BORKOSKI J N, KAFKA R J. Analytical tool requirements for power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1582-1591.
- [15] ADIBI M M, KAFKA R J. Power system restoration issues[J]. IEEE Computer Application in Power, 1991, 4(2): 19-24.
- [16] ADIBI M M, FINK L H, ANDREWS C J, et al. Special considerations in power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(4): 1419-1424.
- [17] ADIBI M M. Special considerations in power system restoration—the second working group report[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 15-21.
- [18] HUANG J A, AUDETTE L, HARRISON S. A systematic method for power system restoration planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 869-875.
- [19] SALVATI R, SFORNA M, POZZI M. Restoration project [Italian power restoration plan][J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2004, 2(1): 44-51.
- [20] 郭嘉阳, 吴涛, 张仁伟, 等. 华北电网“黑启动”试验研究[J]. 华北电力技术, 2001(5): 3-18.
GUO Jia-yang, WU Tao, ZHANG Ren-wei, et al. Test and research of black start in north China power network[J]. North China Electric Power, 2001(5): 3-18.
- [21] 阮前途, 王伟, 黄玉, 等. 基于燃气机组的上海电网黑启动系列试验[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 19-22.
RUAN Qian-tu, WANG Wei, HUANG Yu, et al. A series of blackstart tests based on gas turbine generators in Shanghai power grid[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 19-22.
- [22] ADIBI M M, FINK L H. Power system restoration planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 22-28.

- [23] FINK L H, LIOU K L, LIU C C. From generic restoration actions to specific restoration strategies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 745-751.
- [24] LINDENMEYER D, DOMMEL H W, KUNDUR P, et al. A framework for black start and power system restoration[C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Halifax, Canada: IEEE, 2000: 153-157.
- [25] 刘艳, 顾雪平, 张丹. 基于数据包络分析模型的电力系统黑启动方案相对有效性评估[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 32-37, 94.
LIU Yan, GU Xue-ping, ZHANG Dan. Data envelopment analysis based relative effectiveness assessment of power system black-start plans[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 32-37, 94.
- [26] ISLAM S, CHOWDHURY N. A case-based expert system for power system restoration[C]//IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Edmonton, Canada: IEEE, 1999: 1159-1163.
- [27] GERMANO L T, da SILVA L E B, RIBEIRO G M, et al. An intelligent tool for power system restoration: an example using CESP[C]//International Conference on Power System Technology. Kunming, China: Powercon, 2000: 1131-1136.
- [28] CHEN Chao-shun, LIN Chai-hung, TSAI Hung-ying. A rule based expert system with colored Petri net models for distribution system service restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 1073-1080.
- [29] SALEK K, SPANEL U, KROST G. Flexible support for operators in restoring bulk power systems [C]//CIGRE/IEEE PES Int Symposium on Quality and Security of Electric Power Delivery Systems. Montreal, Canada: IEEE, 2003: 187-192.
- [30] 王洪涛, 刘玉田, 丘夕照. 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.
WANG Hong-tao, LIU Yu-tian, QIU Xi-zhao. Hierarchical case-based reasoning decision-making system for power system black start[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 49-52.
- [31] CHIN Hong-Chan, SU Yuh-Sheng. Application of the Ant-based network for power system restoration[C]//IEEE/PES Trans and Distr Conf and Exhibition: Asia and Pacific. Dalian, China: IEEE, 2005: 1-5.
- [32] NAGATA T, TAO Y, FUJITA H. An autonomous agent for power system restoration[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. Denver, USA: IEEE, 2004: 1069-1074.
- [33] SOLANKI J M, SCHULZ N N, GAO Wen-zhong. Reconfiguration for restoration of power systems using a multi-agent system[C]//Power Symposium Proceedings of the 37th Annual North American. Ames, USA: IEEE, 2005: 390-395.
- [34] LIU Dong, CHEN Yun-ping, SHEN Guang, et al. A multi-agent based approach for modeling and simulation of bulk power system restoration [C]//IEEE/PES Trans and Distr Conf and Exhibition: Asia and Pacific. Dalian, China: IEEE, 2005: 15-18.
- [35] NAGATA T, TAHARA Y, FUJITA H. An agent approach to bulk power system restoration[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco, USA: IEEE, 2005: 1312-1317.
- [36] LI Ling, LIAO Zhi-wei, HUANG Shao-xian, et al. A distributed model for power system restoration based on ant colony optimization algorithm[C]//IEEE/PES Trans and Distr Conf and Exhibition: Asia and Pacific. Dalian, China: IEEE, 2005: 15-18.
- [37] COOPER M E, ADIBI M M. Bulk power system restoration training techniques[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 191-197.
- [38] MILLER G, STOREY A, VADARI V, et al. Experiences using the dispatcher training simulator as a training tool[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 1126-1132.
- [39] ISLAM S, CHOWDHURY N. A case-based Windows graphic package for the education and training of power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(2): 181-187.
- [40] SFORNA M, BERTANZA V C. Restoration testing and training in Italian ISO[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 1258-1264.
- [41] SILVA A, VALE Z, RAMOS C. Cooperative training of power systems restoration techniques [C]//Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems. Seoul, Korea: IEEE, 2005: 36-42.
- [42] 张慎明, 姚建国. 调度员培训仿真系统(DTS)的现状和发展趋势[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 60-66.
ZHANG Shen-ming, YAO Jian-guo. Current situation and development trend of dispatcher training simulator[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 60-66.
- [43] 孙宏斌, 吴文传, 张伯明. 电网调度员培训仿真系统的新特性和概念扩展[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 6-11.
SUN Hong-bin, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. New features and function extension of dispatcher training simulator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 6-11.
- [44] ADIBI M M, BORKOSKI J N, KAFKA R J, et al. Frequency response of prime movers during restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 751-756.
- [45] JADID S, SALAMI A. Accurate model of hydroelectric power plant for load pickup during power system restoration[C]//TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference. Chiang Mai, Thailand: IEEE, 2004: 307-310.
- [46] FURUKAWA K, IZENA A, SHIMOJO T, et al. Governor control study at the time of a black start[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. Denver, USA: IEEE, 2004 (2): 1521-1526.
- [47] NADIRA R, DY LIACCO T E, LOPARO K A. A hierarchical interactive approach to electric power system restoration [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(3): 1123-1131.
- [48] 周云海, 闵勇. 恢复控制中的系统重构优化算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 67-70, 188.
ZHOU Yun-hai, MIN Yong. Optimal algorithm for system reconstruction[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 67-70, 188.
- [49] IHARA S, SCHWEPPE F C. Physically based modeling of cold load pickup[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(9): 4142-4150.
- [50] CHAVALI S, PAHWA A, DAS S. A genetic algorithm approach for optimal distribution feeder restoration during cold load pickup [C]//Proc of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. Hawaii, USA: IEEE, 2002: 1816-1819.
- [51] MOHANTY I. Ant algorithms for the optimal restoration of distribution feeders during cold load pickup[C]//IEEE Swarm Intelligence Symposium. Indiana, USA: IEEE, 2003: 132-137.
- [52] 周云海, 闵勇. 负荷的快速恢复算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 74-79.
ZHOU Yun-hai, MIN Yong. Optimal algorithm for fast load recovery [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 74-79.
- [53] WANG Qin, AJJARAPU V. A novel approach to implement generic load restoration in continuation-based quasi-steady

- state analysis[J]. IEEE Trans on Power systems,2005,20(1): 516-518.
- [54] HUANG S J, HUANG C C. Adaptive approach to load shedding including pumped-storage units during underfrequency conditions[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(2): 165-171.
- [55] QUAIA S, MARCHESIN A, MARSIGLI B, et al. Using pumped storage loads in restoration paths: a field test in the italian national grid[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 1580-1587.
- [56] ADIBI M M, ALEXANDER R W, AVRAMOVIC B. Overvoltage control during restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(4): 1464-1470.
- [57] ADIBI M M, MILANICZ D P. Reactive capability limitation of synchronous machines[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 29-40.
- [58] ADIBI M M, MILANICZ D P, VOLKMANN T L. Optimizing generator reactive power resources[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 319-324.
- [59] ADIBI M M, POLYAK R A, GRIVA I A, et al. Optimal transformer tap selection using modified barrier - augmented Lagrangian method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 251-257.
- [60] ADIBI M M, ALEXANDER R W, MILANICZ D P. Energizing high and extra-high voltage lines during restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1121-1126.
- [61] 程改红, 徐政. 电力系统故障恢复过程中的过电压控制[J]. 电网技术, 2004, 28(11): 29-33.
CHENG Gai-hong, XU Zheng. A method to control sustained overvoltage during power system restoration[J]. Power System Technology, 2004, 28(11): 29-33.
- [62] 钱家骊, 袁大陆, 徐国政. 对 1000 kV 电网操作过电压及相位控制高压断路器的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 1-4, 8.
QIAN Jia-li, YUAN Da-lu, XU Guo-zheng. Discussion on switching overvoltage in 1000 kV power networks and phase controlled circuit breaker[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 1-4, 8.
- [63] 张玉琼, 顾雪平. 基于随机统计分析的黑启动操作过电压的计算校验[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 92-97.
ZHANG Yu-qiong, GU Xue-ping. Computation and statistical evaluation of operating over-voltages in black-start process of power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(5): 92-97.
- [64] 李鹏源, 顾雪平. 基于神经网络的黑启动操作过电压快速预测[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 66-70.
LI Peng-yuan, GU Xue-ping. Fast determination of switching overvoltage in black start process based on artificial neural networks[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 66-70.
- [65] KETABI A, RANJBAR A M, FEUILLET R. Analysis and control of temporary overvoltages for automated restoration planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 1121-1127.
- [66] 程改红, 徐政. 电力系统故障恢复初期的谐波过电压问题[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 14-19.
CHENG Gai-hong, XU Zheng. Analysis and control of harmonic overvoltages during early stage of power system restoration[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 14-19.
- [67] ADIBI M M, MILANICZ D P. Protective system issues during restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1492-1497.
- [68] SIDHU T S, TZIOUVARAS D A, APOSTOLOV A P, et al. Protection issues during system restoration[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 47-56.
- [69] 刘映尚, 张碧华, 周云海. 黑启动过程中继电保护和自动装置的特性和运行[J]. 中国电力, 2005, 38(5): 25-28.
LIU Ying-shang, ZHANG Bi-hua, ZHOU Yun-hai. Operational issues of protections and system security equipments in black start[J]. Electric Power, 2005, 38(5): 25-28.
- [70] WUNDERLICH S, ADIBI M M, FISCHL R, et al. An approach to standing phase angle reduction[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 470-478.
- [71] HAZARIKA D, SINHA A K. An algorithm for standing phase angle reduction for power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(4): 1213-1218.
- [72] HAZARIKA D, SINHA A K. Standing phase angle reduction for power system restoration[J]. IEE Proc-Gen, Trans and Distr, 1998, 145(1): 82-88.
- [73] MARTINS N, de OLIVEIRA E J, PEREIRA J L R, et al. Reducing standing phase angles via interior point optimum power flow for improved system restoration[C]//IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. New York, USA: IEEE, 2004: 404-408.
- [74] 李阳坡, 顾雪平, 刘艳. 电力系统黑启动过程中线路继电保护的配置与整定[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 89-92, 107.
LI Yang-po, GU Xue-ping, LIU Yan. Determination of line protection scheme and settings during power system black-start[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 89-92, 107.
- [75] LU Ying, KAO Wen-shiow, CHEN Yung-tien. Study of applying load shedding scheme with dynamic D-factor values of various dynamic load models to Taiwan power system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1976-1984.
- [76] CANIZARES C A, ALVARADO F L. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 1-8.
- [77] KHUSHALANI S, SCHULZ N N. Restoration optimization with distributed generation considering islanding[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco, USA: IEEE, 2005: 2445-2449.
- [78] 常乃超, 兰洲, 倪以信, 等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 46-52.
CHANG Nai-chao, LAN Zhou, NI Yi-xin, et al. A survey on applications of wide-area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 46-52.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

刘 强(1979-), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 研究方向为电力系统恢复控制(E-mail: liuqiang_ncepu@yahoo.com.cn);

石立宝(1971-), 男, 辽宁清源人, 副教授, 博士, 研究方向为大规模电力系统安全经济运行、计及 FACTS 的电力系统动态安全评估、计算智能/网格技术及其在电力系统中的应用、EMS/DTS 系统集成;

周 明(1967-), 女, 湖北宜昌人, 副教授, 博士, 研究方向为电力市场、电能质量、电网调度自动化;

李庚银(1964-), 男, 河北雄县人, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力市场、电能质量、新型输配电技术等;

倪以信(1946-), 女, 上海人, 副教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、稳定与控制、HVDC、FACTS 以及电力市场等。

(下转第 114 页 continued on page 114)

Survey of power system restoration control

LIU Qiang¹,SHI Li-bao²,ZHOU Ming¹,LI Geng-yin¹,NI Yi-xin³

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. National Key Laboratory of Power Systems in Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 3. Department of Electrical and Electronics Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: An overview of power system restoration control is presented, including its tasks, main issues and solutions. The power system restoration control can be divided into four aspects: recovery scheduling and training, active power balance and frequency control, reactive power balance and voltage control, and coordination of relay protection and automatic security equipment. Recovery scheduling is a complicated optimization problem, which can be offline solved using both optimization algorithm and artificial intelligence technology. Active power balance and frequency control should consider both generation and load recoveries. The former is a dynamic planning for the maximum power energy during recovery with all operating constraints satisfied, while the latter takes place at the same time of generation recovery with frequency and network constraints satisfied and load priority considered. It includes genetic algorithm, ant colony optimization method and other approximation algorithms. In reactive power balance and voltage control, the causes of sustained power frequency over-voltage, switching over-voltage and harmonic over-voltage are discussed, and their prediction and control methods are summarized, including sensitivity analysis, probability and statistics, neural network, etc. In coordination of relay protection and automatic security equipment, its key points and solutions in different restoration stages are discussed.

This project is supported by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (2004CB217900) and the National Natural Science Foundation of China (50337010).

Key words: power system; restoration control; artificial intelligence technology; active power and frequency control; reactive power and voltage control