

文章编号:1671-6833(2005)02-0047-04

基于功率平衡保护的紧急负荷控制研究

吴 军, 涂光瑜, 罗 毅, 陈德树

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 负荷控制是电网发生扰动时为维持暂态稳定而采取的传统手段. 紧急负荷控制需要解决系统功率稳定、频率稳定、电压稳定、线路负荷 4 个问题. 通过与传统的稳定控制计算控制方法进行比较, 提出基于功率平衡保护的紧急负荷控制. 其实施原则是: 在大区电网间出现交换功率突变时, 根据突变前本区域电网的功率平衡状态制定出扰动后的功率平衡要求, 在大扰动发生后紧急对系统的负荷进行调整, 同时给出紧急负荷控制在时间及控制点方面的选择与设定方法.

关键词: 电网稳定; 功率平衡; 紧急负荷控制

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

0 引言

电力系统在损失一定的电源或者负荷后往往需要通过快速调整负荷来达到电源与负荷之间的相对平衡, 以维持系统稳定运行. 当区域电网从大的电网中因事故或误操作原因而解列出来时, 区域内功率平衡发生突变, 切机/切负荷更成为维持系统稳定的最直接手段. 随着我国全国联网的深入加紧进行, 我国电力传输网络规模越来越大, 而发生大扰动后电网的安全与稳定问题也成为目前关注的焦点. 如何在紧急状态下对负荷进行合理有效的调整, 也成为解决电网稳定控制的一个关键问题.

紧急负荷控制所需要解决的问题主要有以下几种^[1]:

(1) 系统功角稳定问题. 功角是系统任意并联的 2 台发电机(或等值发电机)之间的相对角度. 功角稳定是指系统受扰动后各发电机是否维持同步, 或转子之间是否维持同摆的问题. 当系统功角稳定破坏时, 系统大范围内众多运行参量如电流、电压、功率和能量都要发生剧烈变化, 出现严重后果.

(2) 系统频率稳定问题. 系统各发电机能维持同步运行, 但各发电机的转速却同步地改变, 不断地升高或降低. 在此情况下, 系统虽能保持功角稳定, 但不能继续安全运行, 因为失去了频率稳

定性.

功角稳定与频率稳定虽都与发电机转子运动有关, 但原因与后果都不相同. 功角稳定决定于发电机之间有功功率分配, 而频率稳定决定于全系统有功功率是否平衡.

(3) 系统电压稳定问题. 指系统内某一节点或某些节点的电压受扰动后的稳定行为. 一般电压失去稳定是指受扰动后电压不断大幅度下降的状况, 故称为电压崩溃.

由于系统电压分布与系统无功功率潮流分布密切相关, 所以系统电压稳定问题也与系统无功功率分布的特性有关.

(4) 线路过负荷问题. 在系统线路出现故障并切除情况下, 系统潮流发生改变, 能量传输进行了重新分配, 部分线路可能会出现超过安全负载能力的情况, 线路长时间的过负荷主要会体现在热效应的积累上, 将导致后续切线路等事故的发生, 使系统能量传输情况进一步恶化并发生连锁反应最终导致系统解列.

1 紧急负荷控制措施

紧急负荷控制可以采取的措施不仅包括对负荷或机组的切除操作, 还应包括系统丢失大的负荷之后的备用耗能设备或储能设备的投入等. 基本的负荷控制手段主要有:

(1) 基于继电保护设备的故障线路/负荷切

收稿日期:2005-01-20;修订日期:2005-03-17

作者简介:吴 军(1977-),男,上海市人,华中科技大学博士研究生,主要从事电网安全稳定控制及电力市场方面的研究.
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

除.当电气设备由于某种原因发生故障时,首先是其自身的继电保护装置动作,将故障设备或线路切除,包括事故远切/联切系统等,此时发生故障的负荷或线路就从系统中被隔离开来,等待重合闸动作或者故障的修复.

系统由于事故后功率不平衡的而出现频率及电压的波动,当频率/电压低于或高于某一设定值时,或频率/电压变化率 df/dt 及 dV/dt 达到某一设定值时启动减负荷装置,以实现严重功率缺额时快速切除.

(2) 自动发电控制(AGC)及旋转备用投入. AGC 及旋转备用的投入可以作为紧急负荷控制的先期手段,同样以调节功率平衡为目的,但是在事故状态下调节能力有限,而其他紧急负荷控制手段的采用都必须考虑到 AGC 与旋转备用或其他备用投入后系统的新的暂态稳定状态而后决定负荷控制调节的量.

(3) 紧急耗能设备/蓄能设备投入.当系统出现丢失大量负荷的事故,而发电机端尚未来得及进行出力调整时,系统功率出现严重不平衡,此时投入紧急耗能设备将电能转化成热能或物理能消耗掉,或者投入蓄能设备.目前较成熟的可用于紧急负荷控制的蓄能手段包括蓄冷/蓄热锅炉或空调、飞轮蓄能、超导蓄能等,而传统的抽水蓄能由于响应时间过长而暂时不做考虑.

2 紧急负荷控制的计算

目前,紧急负荷控制规律一般采用逻辑或控制策略表方法,前者难以适应系统的各种运行情况,不同的故障类型和位置,后者控制量是阶梯式,在实时控制时不可避免地存在着误差.其他还有诸如数值积分法、灵敏度法、同比例法、人工神经网络法等.

文献[2]中提出采用单隐层前馈神经网络计算方法,文献[3]提出采用数值积分的方法进行切负荷计算.作者采用发电机组最大相对摇摆角小于某一给定值为暂态稳定约束函数,然后基于数值积分法给出暂态稳定约束函数相对于切负荷控制量的灵敏度计算公式,并在此基础上提出一种新的切负荷算法.文献[4]在分析低电压切负荷机理的基础上,提出了一种新的低电压切负荷控制算法.通过考虑负荷的动态特性,快速地算出负荷的切除量,将系统稳定在指定的电压上.当电压失稳时,能有效地得出使系统电压保持稳定的负荷切除量,同时分析了负荷的切除量、切除时间同动

态负荷参数的关系,及切除时间对控制效果的影响.文献[5]提出采用多输入单输出的单隐层前向神经网络对所切负荷量进行计算.文献[6]提出将非线性系统稳定域边界理论与稳定控制措施相结合,通过控制措施所引起系统平衡点位移在稳定域边界外法向量上的投影来表征控制措施的有效性,同时计算出需切掉的发电或负荷的量.

以上方法对于负荷控制量的计算主要集中在负荷切除部分,且其所存在的共同问题是计算复杂,响应周期较长,在大扰动情况之下容易造成过切而引起系统的新的不稳定.

3 基于功率平衡保护的紧急负荷控制

依据电力系统安全保护的概念,紧急负荷控制可用于实施区域电网的功率平衡保护以实现大扰动情况下电网的暂态稳定控制,其实施原则是:在大区电网间出现交换功率突变时,根据突变前本区域电网的功率平衡状态制定出扰动后的功率平衡要求,通过分层分布快速控制加以实现[7],给出紧急状况下最大与最小负荷控制的计算方法.

设在一区域电网内有 N 台发电机, K 条对外联络线, N_0 、 K_0 为 N 和 K 在大扰动前的数值,并设 $S_{n,i}$ 为第 i 台发电机的额定功率; $S_{o,i}$ 为第 i 台发电机在大扰动前的实际出力; $S_{n,j}$ 为第 j 条与外系统联结的输电线的限定满载功率; $S_{o,j}$ 为第 j 条与外系统联结的输电线在大扰动前的实际功率; S_j 为第 j 条与外系统联结的输电线在大扰动后的实时功率; $S_{r,G}$ 为大扰动前本区域电网的旋转备用功率; $S_{r,l}$ 为大扰动前对外联结线的总输入功率裕量; $P_{o,1}$ 为受控可切除的各负荷点大扰动前总负载功率; $P_{o,2}$ 为不受系统控制切除的各负荷点大扰动前总负载功率; P_d 为大扰动前网损及厂用电总功率; P_l 为大扰动后的总功率数值; P_e 为紧急负荷调整功率.

大扰动前的旋转备用功率为

$$S_{r,G} = \sum_{i=1}^{N_0} (S_{n,i} - S_{o,i}) \tag{1}$$

对外部系统联接线的输送能力裕量为

$$S_{r,l} = \sum_{j=1}^{K_0} (S_{n,j} - S_{o,j}) \tag{2}$$

大扰动前功率平衡方程为

$$\sum_{i=1}^{N_0} S_{o,i} + \sum_{j=1}^{K_0} S_{o,j} = P_{o,1} + P_{o,2} + P_d \tag{3}$$

按保持稳定平衡条件下的最小调整功率调整负荷的大扰动后功率平衡方程为

$$\sum_{i=1}^N S_{n,i} + \sum_{j=1}^{K-1} S_{n,j} = P_{o1} + P_{o2} + P_d - P_c \quad (4)$$

近似地,令 $P_l \approx P_d$, 将式(3) 减去式(4), 可得最小负荷调整量为

$$P_c = (\sum_{i=1}^{N_0} S_{o,i} - \sum_{i=1}^N S_{o,i}) + (\sum_{j=1}^{K_0} S_{o,j} - \sum_{j=1}^{K-1} S_j),$$

即

$$P_{cmin} = \Delta S_N - S_{r,G}) + (\Delta S_K - S_d) \quad (5)$$

不考虑动用各发电机及联结线的备用能力时的平衡方程为

$$\sum_{i=1}^N S_{o,i} + \sum_{j=1}^{K-1} S_{o,j} = P_{o1} + P_{o2} + P_l - P_c \quad (6)$$

令式(3) 减去式(6), 得不考虑发电机及联结线备用能力下的最大负荷调整量:

$$P_c = (\sum_{i=1}^{N_0} S_{o,i} - \sum_{i=1}^N S_{o,i}) + (\sum_{j=1}^{K_0} S_{o,j} - \sum_{j=1}^{K-1} S_{o,j}),$$

即

$$P_{cmax} = \Delta S_N + \Delta S_K \quad (7)$$

其中, ΔS_n 为事故后发电机出力改变导致的功率变化; ΔS_k 为事故后线路传输状况发生改变导致的功率变化.

其中要注意的是, 当 $P_c > 0$, 紧急负荷调整方式为切除负荷; 当 $P_c < 0$, 紧急负荷调节方式为切机或耗能设备 / 蓄能设备投入.

4 紧急负荷控制中的其他问题

4.1 紧急负荷控制时间选择

目前系统中切负荷时间的整定原则是: 当系统损失一定量的电源后立即启动切负荷装置, 考虑到通道的传输时间以及装置的延时等因素, 切负荷时间约为 0.4s. 如果切负荷的目的是保持系统在第 1 或第 2 个摇摆中的稳定性, 即暂态稳定性, 则至少应在系统暂态失稳之前切负荷. 但有时, 系统虽然是暂态稳定的, 某些联络线上的功率在后续摇摆中却超过了限制, 这时也需要切一定量的负荷以减小系统的后续摇摆, 提高系统的动态稳定性. 在这种情况下, 切负荷的时间并不是越快越好, 而是存在一个最佳的切负荷时刻^[8,9].

通过改变切负荷的时刻并进行仿真计算的结果发现, 不同的切负荷时刻对于联络线功率的振荡有不同的影响, 如果能选择一较好的时刻切负荷, 可以使联络线功率的振荡幅度明显降低, 而靠提高负荷调整的量有时无法做到这一点, 这也是选择最佳切负荷时刻的目的所在.

通过仿真计算表明, 最佳紧急负荷控制的时间

间选择在扰动后 5~10 个周波时, 调整的效果比较理想.

4.2 紧急负荷控制点的设定

由于集中切负荷造成对用户直接停电, 过切时不但损失了一些不必要的用户, 而且可能引起系统频率过高, 而切负荷不足时又达不到预期的控制效果, 所以对集中切负荷控制, 前人研究较多的是合理确定切负荷量. 至于切负荷地点, 应当是在受端系统中离减速发电机电气距离最近的负荷点上切负荷, 最有利于该减速发电机的功率平衡.

切负荷的作用依赖于切负荷点到减速发电机之间的电气距离, 在离减速发电机电气距离最近的负荷点上切负荷, 将最有利于该减速发电机的功率平衡. 所以, 切负荷地点所满足的基本条件是, 切负荷点与减速发电机之间的电气距离应小于它与加速发电机之间的电气距离^[8].

在一般情况下, 可切的负荷点不可能离暂态期间减速的发电机在电气距离上非常近. 不同于电阻制动这类控制, 直接作用于加速发电机的母线上, 所以用切负荷来提高暂态稳定性的效果通常并不明显. 另一方面, 切负荷造成对用户直接停电, 因而对于用切负荷来提高系统暂态稳定性的研究并不多. 当然在有一些系统中, 如果可切负荷点离受端系统发电机的电气距离很近, 远小于它与送端系统发电机的电气距离, 而且这些负荷也是不重要的负荷, 这种情况下, 系统故障后切去这些负荷也会是暂态稳定控制的一种有效方式. 在应用集中切负荷控制时需要注意的是受端系统的某些负荷并不满足这一基本条件, 在这些点上切负荷对系统的暂态稳定性影响更小.

5 存在的问题及思考

紧急负荷控制的实施直接目的是为了在最短时间内恢复系统的稳定, 以故障状态前的功率状态为参照系, 在大扰动发生后紧急对系统的负荷进行调整, 以减低系统的震荡幅度, 如功角、频率、电压等, 最终维持系统在故障后的暂态稳定, 而此时重合闸是否成功对系统已经没有太大的影响.

但是对紧急负荷控制的各种手段和方案的采用还必须考虑到如下问题:

(1) 紧急负荷控制必须同时考虑最优切负荷计算方法与快速负荷控制对稳定的影响两方面的问题.

(2) 基于紧急负荷控制的电网稳定控制在考虑到交直流混合输电系统时负荷控制的复杂性.

(3) 大电网故障及扰动主要集中在输电网或输电网之间的联络线上,而紧急负荷控制大部分集中在配电网侧,因此在进行时必须综合考虑主干输电网与配电网的协调控制问题.

(4) 紧急负荷控制在多电压等级系统及系统内多级变压器运行情况下的容量传递问题.

(5) 大电网在发生扰动时的稳定问题必须考虑到故障线路上的负荷转移及相邻线路的可用传输容量,是否会发生线路过负荷,是否会有潮流逆送等等,都会对紧急负荷控制措施的选择产生直接的影响.

(6) 电力市场环境下,紧急负荷控制涉及用户负荷调整的经济问题.

参考文献:

[1] 洪佩孙. 关于电力系统稳定(I)[J]. 江苏电机工程, 2001, 20(12): 47~48.
[2] 张明, 张保会, 宋元峰. 基于神经网络的电力系统

负荷稳定控制研究[J]. 中国电力, 1996, 29(4): 7~11.
[3] 毕兆东, 王建全, 韩祯祥. 基于数值积分法灵敏度的快速切负荷算法[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 4~7, 43.
[4] 周小尧, 程浩忠, 许进, 等. 考虑负荷动态的低电压切负荷[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(2): 248~250.
[5] 袁宇春, 张保会, 雷敏. 用 ANN 决定电力系统的切负荷控制[J]. 中国电力, 1997, 30(7): 3~5, 20.
[6] 张瑞琪, 闵勇, 侯凯元. 电力系统切机/切负荷紧急控制方案的研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 6~12.
[7] 陈德树. 大电网保护技术初探[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 14~17, 27.
[8] 袁宇春, 张保会. 切负荷时刻对系统稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(11): 10~12.
[9] 袁宇春, 张保会. 最佳切负荷时刻的计算[J]. 继电器, 1999, 27(11): 1~4.

Study on Emergency Load Control Based on Power Balance Protection

WU Jun, TU Guang-yu, LUO Yi, CHEN De-shu

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract : Load control is a conventional method for maintaining transient stabilization while disturbance occurred in grid. It is mentioned in this paper that the problem needed to be solved and the method be used by emergency load control. Compared with the conventional means of calculating and operating for stability control, the emergency load control based on power balance protection is of great importance for the security and stability control of power grid. When exchange electricity power mutation appears among region grids, it regulates system load preemptorily while disturbance occurred according to the power balance status of local grid power before the disturbance. The selecting method for time and location selection of emergency load control is also mentioned.
Key words : grid stability; power balance; emergency load control