

最佳切负荷时刻的计算

袁宇春¹, 张保会²

(1. 浙江大学电机系, 浙江 杭州 310027; 2. 西安交通大学电力系, 陕西 西安 710049)

【摘要】 分析了电力系统中集中切负荷控制的时刻对系统稳定性的影响, 给出了计算集中切负荷控制最佳时刻的方法。仿真结果表明, 在切负荷量和切负荷地点一定的条件下, 最佳时刻进行的集中切负荷控制可以使控制结束后系统的振荡减小。

【关键词】 切负荷; 最优时刻

1 引言

电力系统在损失一定的电源后往往需要通过切除一定量的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。切负荷控制措施所能解决的系统问题主要有以下几种^[1]: 1) 防止系统频率过低而引起频率崩溃; 2) 防止系统电压过低; 3) 防止线路过负荷; 4) 维持系统暂态或动态稳定。

在某些电力系统中, 因故障而失去大电源后, 在低频减载动作以前系统可能已经失去暂态稳定。在这种情况下, 及时切除部分负荷是保持系统稳定的措施之一。另外在用切机来改善暂态稳定的同时也常联切负荷。有时系统虽然是暂态稳定的, 但是某些联络线上的功率在后续摇摆中很严重, 超过了限制, 或者为了防止故障后线路过负荷, 这时也需要切一定量的负荷以减小故障后线路的传输功率或减轻系统的后续摇摆, 提高系统动态稳定性。

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^[2,3]。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, 这一点在下面关于切负荷控制作用原理的讨论中说明。

在切负荷地点和切负荷量一定的条件下, 不同的切负荷时刻对应切负荷完成后系统不同的动态品质。本文将主要研究切负荷地点和切负荷量一定的条件下, 切负荷时刻对系统稳定性的影响以及最佳切负荷时刻的计算问题。由于切负荷地点直接关系到切负荷控制的效果, 所以也将对切负荷地点所满足的基本条件作一些简单的讨论。

2 集中切负荷的控制原理及切负荷地点所满足的基本条件

这里讨论的稳定性是指暂态和动态稳定性。对于故障切除后的系统, 有一部分发电机相对于惯性中心是加速的, 另一部分发电机相对于系统惯性中心是减速的。相对于惯性中心加速的发电机, 如果它可能失去稳定, 则所应采用的控制是切机或电阻制动等, 这类控制的作用是阻尼发电机的加速。而相对于惯性中心减速的发电机, 如果它可能在减速方向失稳, 则切负荷也是一种控制方式, 它的作用在于阻尼发电机减速。所以就用于暂态稳定控制的切负荷而言, 其作用原理与电阻制动正好相反。

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。

在一般情况下, 由于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进行的并不多。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。

3 切负荷时刻对系统稳定性影响的分析

我们知道,故障期间发电机获得的加速度的大小与发电机到故障点的电气距离有关。对于两个系统联络线上的故障,有时由于故障地点在电气距离上可能更接近于受端系统的发电机,所以故障期间受端系统的发电机会获得更大的加速能量。这种情况下,故障切除后有一段时间内,受端系统的发电机相对于系统惯性中心的角度是超前的。根据前面的分析,用切负荷来提高系统暂态稳定性的原理是阻尼故障后发电机的减速。所以在这段时间内在受端系统切负荷会使得受端系统发电机相对于系统惯性中心的角度更加超前,因而对系统的稳定是不利的。当然在一般情况下,由于故障线路切除后受端系统功率不足,这段时间是很短的,在此期间受端系统发电机相对于惯性中心的角度不可能超前很大。

在大多数情况下,集中切负荷的目的是为了防止线路过负荷以及减小联络线功率的振荡来满足系统动态稳定的要求。本文的分析计算表明切负荷的时刻对切负荷后系统的振荡有明显的影响。如果能选择一较好的时刻切负荷,可以使得联络线功率的振荡幅度有明显的降低,而在一个不好的时间切负荷,反而会使得联络线功率的振荡加剧,而且切负荷量越大,联络线功率振荡越剧烈。

联络线功率振荡的实质是线路所连接的系统之间发电机功角的振荡。所以,下面从切负荷时刻对发电机功角振荡的影响来进行分析。

当用经典模型来研究时,若切负荷前系统是暂态稳定的,离切负荷点电气距离近的发电机功角相对于惯性中心是周期性振荡的。即在某一时间段内该发电机相对于惯性中心的角度是超前的,而另一段时间内相对于惯性中心的角度是滞后的。前面已讲过,切负荷的作用在于阻尼发电机的减速,所以如果在该发电机相对于惯性中心的角度是滞后的期间切负荷将会减小发电机功角相对于惯性中心摆开的距离,有利于系统的稳定。而如果在该发电机相对于惯性中心的角度是超前期间切负荷则将会增大发电机功角相对于惯性中心摆开的距离,这时切负荷则不利于系统的稳定。

4 计算最佳切负荷时刻的数学模型

本文将电力系统的暂态能量用于最优切负荷时刻的研究。忽略阻尼时切负荷前系统的暂态能量表达式为^[4]:

$$V^- = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\delta_i - \delta_{is}) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \delta_{ij} - \cos \delta_{ijs})] + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \cos \delta_{ij} d(\delta_i + \delta_j) = V_C^- \quad (1)$$

上式中 δ_{is} ($i=1, 2, \dots, n$) 为切负荷前各个发电机的稳定平衡点, P_i , C_{ij} 和 D_{ij} 由切负荷前系统的导纳矩阵求出。

设 δ_{is} ($i=1, 2, \dots, n$) 为切负荷后各个发电机的稳定平衡点, P_i , C_{ij} 和 D_{ij} 由切负荷后系统的导纳矩阵求出,则切负荷后系统的暂态能量表达式为:

$$V^+ = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\delta_i - \delta_{is}) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \delta_{ij} - \cos \delta_{ijs})] + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \cos \delta_{ij} d(\delta_i + \delta_j) = V_C^+ \quad (2)$$

令切负荷时间为 t_{qj} , 则切负荷前瞬间系统的暂态能量为:

$$V_{tq}^- = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_{tqi}^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\delta_{tqi} - \delta_{is}) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \delta_{tqij} - \cos \delta_{ijs})] + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \cos \delta_{tqij} d(\delta_i + \delta_j) = V_C^- \quad (3)$$

切负荷后瞬间系统的暂态能量为:

$$V_{tq}^+ = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_{tqi}^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\delta_{tqi} - \delta_{is}) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \delta_{tqij} - \cos \delta_{ijs})] + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \cos \delta_{tqij} d(\delta_i + \delta_j) \quad (4)$$

V_{tq}^+ 越小切负荷后功角的摇摆幅度越小,联络线功率的振荡也越小,系统的稳定性越好。所以最佳切负荷时刻所满足的条件是 V_{tq}^+ 取得最小值。用优化方法计算上式是很困难的,本文将给出一种简单的计算方法。

分析式(4)可以看出,当 t_{qj} 变化时式中只有 $\tilde{\omega}_{tqi}$ 和 δ_{tqi} 与 t_{qj} 有关,其余变量只决定于切负荷后系统的参数,与时刻无关。所以如果能够知道切负荷前各

个时刻系统的状态变量 \tilde{x}_{tqi} 和 x_{tqi} , 由于 \tilde{x}_{tqi} 和 x_{tqi} 在切负荷前后不能突变, 则可以由式(4)计算出该状态变量所对应的切负荷后的系统的暂态能量, 将得到一个随时间变化的暂态能量, 当此暂态能量为最小的时刻就是我们所求的 t_q 。

根据以上的分析给出计算最佳负荷时刻的步骤如下:

1) 计算出切负荷后系统的稳定平衡点和收缩到发电机内节点的导纳矩阵, 由此形成控制后系统的暂态能量函数方程;

2) 计算出切负荷前每一时刻的系统状态变量 $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ 和 $\tilde{x}(t) = [\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t), \dots, \tilde{x}_n(t)]^T$;

3) 用第1步的能量函数和第2步计算出的系统状态变量 $x(t)$ 和 $\tilde{x}(t)$ 求系统的暂态能量;

4) 由第3步计算出的暂态能量是随时间变化的, 它达到最小值的时刻就是最佳切负荷时刻。

5 算例

算例为西北电力系统, 其主要接线图如图1所示。图中西部电网通过两回联络线(称为炳陇线)送入关中网的功率为500MW, 关中电网为受端系统。计算条件为, 炳陇线中有一回故障后切除。设0.0s炳陇线一回发生三相故障, 0.1s切除故障线路。

对于西北电网的这种运行方式, 仿真表明, 故障后西部网与关中网之间不存在暂态稳定问题。为了防止故障线路切除后西部电网与关中电网联络线上的功率超过限制, 需要在关中电网采取集中切负荷控制, 设切负荷量为140MW, 在这种情况下, 本文将研究切负荷时刻对切负荷后系统振荡的影响。

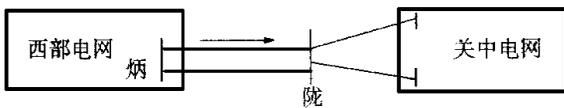


图1 西北系统的主要接线图

图2是由切负荷后的稳定平衡点和系统导纳矩阵来计算的不切负荷情况下系统的暂态能量。由图中可见, 在0.8s时这一能量达到其在暂态期间的最大值0.66p.u., 而在1.8s时这一能量达到其在暂态期间的最小值0.46p.u.。根据本文的分析, 0.8s是最差的切负荷时刻, 而1.8s为最佳切负荷时刻。在故障切除的时刻0.1s, 能量值为0.51p.u., 这说明0.1s也是较好的切负荷时刻, 如果切负荷的时间能够作到很快, 即在故障切除时立即采取切负荷控制,

对于系统的稳定仍然有利。但是一般条件下, 为了保证集中切负荷控制系统具有足够的可靠性, 防止误动作, 这种控制系统都有较复杂的逻辑判断, 这就需要一定的延时, 另外系统的通道传输也要一定的时间, 所以切负荷不可能在故障线路切除后立即完成。这样, 为了保证切负荷后系统的动态稳定性, 减小系统的振荡, 延时到最佳的切负荷时刻进行控制, 对系统的稳定有利。本文计算出的最佳时刻是切负荷完成的时刻, 在实际应用时应有一个考虑通道传输时间和断路器动作时间的提前量。

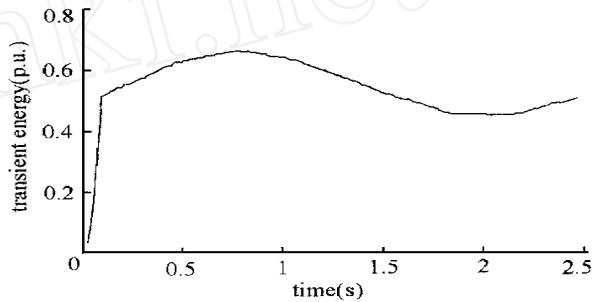


图2 求最佳切负荷时刻的能量曲线

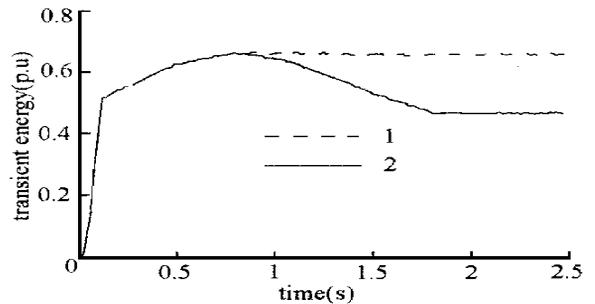


图3 不同时刻切负荷后系统的暂态能量

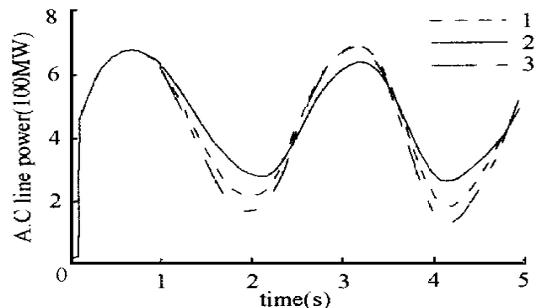


图4 联络线功率的振荡曲线

图3为不同时刻切负荷后系统的暂态能量, 图中曲线1为0.8s切负荷后的能量曲线, 曲线2为1.8s切负荷后的能量曲线。图4为不同时刻切负荷后联络线功率的振荡曲线, 图中曲线1为0.8s切负荷140MW时联络线功率的振荡曲线, 2为1.8s切负荷140MW时联络线功率的振荡曲线。由图可见, 在

1.8s 切负荷后联络线功率的振荡明显小于 0.8s 切负荷后的情况。图中曲线 3 为 0.8s 切负荷 200MW 后联络线功率的振荡曲线。这说明在不适当的时间切负荷,切的负荷量越大,系统的振荡越严重。

6 结论

对于以维持系统动态稳定或防止线路过负荷而采取的集中切负荷控制,切负荷的时间并不是越快越好。本文分析了电力系统中集中切负荷控制的时刻对系统稳定性的影响,给出了计算集中切负荷控制最佳时刻的方法,并以实际算例验证了本文方法的正确性。

仿真结果表明,在切负荷量和切负荷地点一定的条件下,最佳时刻进行的集中切负荷控制最有利于控制结束后系统的稳定,而在一个不好的时刻切负荷,切负荷量越大,系统的振荡越严重。

[参考文献]

- [1] 袁季修. 电力系统安全稳定控制. 中国电力出版社, 1996,12.
- [2] Palaniswamy K A, Sharma J. Optimum Load Shedding Taking Into Account of Voltage and Frequency Characteristics of Loads. IEEE Trans On Power Apparatus and Systems, 1985, PAS - 104(6).
- [3] Taylor C W, Nassief E R, Cresap R L. Northwest Power Pool Transient Stability and Load Shedding Controls for Generation - Load Imbalance. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems. 1981, PAS - 100(7).
- [4] 余贻鑫,陈礼义. 电力系统的安全性和稳定性. 科学出版社,1988.

收稿日期:1999—01—21

作者简介:袁宇春(1970 -),男,博士,研究方向为电力系统稳定分析及控制,电力系统继电保护; 张保会(1953 -),男,博士,博导,研究方向为电力系统稳定分析及控制,电力系统继电保护。

CALCULATING THE OPTIMAL LOAD SHEDDING TIME

YUAN Yu-chun¹, ZHANG Bao-hui²

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract The influence of the load shedding time on power system stability is analyzed in this paper. A method for calculating the optimal load shedding time is given. Simulation for a realistic system shows that control at the optimal time can largely damp the oscillations of the system.

Keywords load shedding; optimal time