

一种基于加速不平衡功率快速估算的切机敏感点 搜寻方法研究

刘莹¹, 刘晓宇¹, 余婧峰¹, 张国芳²

(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司 四川 成都 610041)

摘要: 通过计算绝对动能增量指标可以实现切机敏感点定位。提出根据估算短路故障期间发电机不平衡功率找出切机敏感点的方法。将短路期间的电压分成两部分,一部分是故障前系统潮流,另一部分是故障点等效电动势产生的电压分量。两分量叠加计算出发电机机端电压,再计算出发电机故障期间不平衡功率。根据不平衡功率大小定位切机敏感点。10机39节点系统仿真验证了所换方法的有效性。

关键词: 能量函数; 不平衡功率; 叠加定理; 敏感点

Abstract: The sensitive points of generation tripping could be located by absolute kinetic energy incremental index. A method is proposed which is used to locate this point based on the estimation of unbalanced power during short circuit period. The voltage is separated to two parts: one is determined by the pre-fault power flow, the other is determined by the equivalent voltage at the fault point. The voltages of the generators are calculated with superposition principle. Then the unbalanced power of generators could be computed. The sensitive points of generation tripping are determined by this unbalanced power. The effectiveness of the proposed approach is verified by the simulation results of a 10-machine 39-bus system.

Key words: energy function; unbalanced power; superposition principle; sensitive point

中图分类号: TM76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)05-0038-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.05.009

0 引言

切机与切负荷是电力系统中应用最广泛、技术最成熟的紧急控制手段。有大量的文献对这一方法进行研究。如文献[1]提出用EEAC实现快关和切机,文献[2-3]在局部能量函数(PEF)的基础上提出用PMU检测发电机的转速最大值,并和某一阈值比较后确定切机量。文献[4]基于时域方法仿真得到系统受扰轨迹,并结合实际电网安全稳定控制系统的配置情况和运行要求,给出了暂态稳定下最优紧急控制模型。其中有一类方法是基于发电机不平衡功率的大小而实现切机的。文献[5]提出用 ΔP 积分作为暂态稳定控制的启动判据,文献[6]提出转子绝对动能增量的概念,并指出可以用这一指标对失稳模式判别,文献[7]在绝对动能增量指标的基础上进行0-1规划实现紧急控制。

下面提出一种基于发电机不平衡功率快速估算。将故障期间的电压分成两个部分,通过叠加定

理实现故障期间的电压幅值和相位计算,再进一步计算出发电机故障期间的不平衡功率。通过比较不平衡功率的大小,得到多个候选控制敏感点。

1 短路故障期间系统失稳敏感性指标研究

为便于研究,可对电力系统简化:同步发电机由纵轴暂态电抗 x'_d 及其后恒定电势表示,电势相角与转子角 δ 相一致,负荷用恒定阻抗表示,机械输入功率 P_{mi} 假定为常数。

在上述假设条件下,描述多机电力系统动态特性的微分方程为

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = -D_i \frac{d\delta_i}{dt} + P_{mi} - P_{ei} \quad (1)$$

$(i = 1, 2, \dots, n)$

式中 $C_{ij} = E_i E_j b_{ij}$, $D_{ij} = E_i E_j g_{ij}$,

$$P_{ei} = E_i^2 g_{ii} + \sum_{j \neq i}^n [C_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + D_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)]$$

设 $\frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = \ddot{\delta}_i$, $\frac{d\delta_i}{dt} = \dot{\delta}_i$, $P_{mi} - E_i^2 g_{ii} = P_{0i}$, $\sum_{j \neq i}^n [C_{ij} \sin(\delta_i -$

$$\delta_j) + D_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] = P_i$$

此时方程(1)可表示为

$$M_i \ddot{\delta}_i = -D_i \dot{\delta}_i + P_{0i} - P_i \quad (2)$$

定义相角中心角 $\delta_{0i} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i$, $M_T = \sum_{i=1}^n M_i$, θ_i

$= \delta_i - \delta_0$, $\omega_0 = \dot{\delta}_0$, $\dot{\theta}_i = \omega = \omega - \omega_0$, 则在惯性中心坐标(COI)下考虑零阻尼情况, 系统运动方程可以表示为

$$\begin{cases} M_T \ddot{\delta}_0 = P_{COI} \\ M_i \dot{\omega} = P_{0i} - P_i - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (3)$$

式中, $P_{COI} = \sum P_{0i} - 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \cos \delta_{ij}$ 。对于第*i*台机, 可以用局部能量函数(PEF)^[2,5]表示为

$$\begin{aligned} V_i(\theta, \omega) = & \frac{1}{2} M_i \omega_i^2 - P_{0i}(\theta_i - \theta_i^t) - \\ & \sum_{j=1}^n \frac{\theta_i - \theta_j^t}{\theta_{ij} - \theta_{ij}^t} [C_{ij}(\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^t - D_{ij} \\ & (\sin \theta_{ij} - \sin \theta_{ij}^t))] + \\ & \frac{M_i}{M_T} [\sum_{k=1}^n P_k(\theta_i - \theta_{ij}^t) - \\ & 2 \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \frac{\theta_i - \theta_j^t}{\theta_{ij} - \theta_{ij}^t} D_{kj}(\sin \theta_{kj} - \sin \theta_{kj}^t)] \end{aligned} \quad (4)$$

通常情况下, 在从短路故障发生到故障切除所经过的时间相对较短, 在这段时间内, 虽然发电机转子转速急剧变化, 但是各发电机转子之间的距离往往尚未拉开, 相对于惯量中心的相角变化不是太大, 所以可以忽略局部能量函数中的势能项, PEF能够简单地表示为

$$V_i \approx \frac{1}{2} M_i \omega_i^2 \quad (5)$$

现在讨论PEF与故障期间发电机不平衡功率的关系。第*i*台发电机相对于惯量中心的转子运动方程为

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_i - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \quad (6)$$

对电力系统中的任意发电机而言, 其自身的惯量远远小于电力系统总惯量, $M_i \ll M_T$, 因此式(6)可以简化为式(7)所示。

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_i \quad (7)$$

将式(7)代入式(5), 最终可以得到PEF的表达式为

$$V_i = \frac{1}{2M_i} \left| \int_0^t \Delta P_i dt \right|^2 \quad (8)$$

式中 $\Delta P_i = P_{mi} - P_i$ 。

由式(8)可以看出, 关键的变量为 $\left| \int_0^t \Delta P_i dt \right|^2$, 它的物理意义表示了机组的加速度 $\Delta \omega$, 能够反映故障后机组的加速能量。

研究表明, 短路故障期间的绝对动能增量指标与发电机失稳模式明显相关^[6], 率先失步的发电机动能增量比其余发电机多得多。因此提出利用短路故障期间的绝对动能增量对失稳模式作为判别指标, 其表达式为

$$\Delta E_{ik} = \int_0^{t_c} \Delta P_i dt \quad (9)$$

之所以提出利用绝对动能增量 ΔE_{ik} 代替PEF作为控制敏感的指标, 原因是与PEF动能指标相比, 使用 ΔE_{ik} 有一个明显的优点, 那就是可以从 ΔE_{ik} 的正负看出发电机是加速还是减速。而无论电机是加速还是减速, PEF动能指标总是正数。绝对动能增量有明确的物理意义, 那就是在积分时间段内发电机转子实际机械动能的增量。

式(9)中 t_c 为故障切除时间。若假设在故障期间 ΔP_i 是一个常数, 式(9)可以简化为近似绝对动能增量

$$\Delta E_{ik} = \Delta P_i \times t_c \quad (10)$$

这一假设的合理性同样是基于短路故障持续时间非常短暂。对于有*n*台发电机、收缩到发电机内节点的电力系统模型, 发电机电磁功率为

$$P_i = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1}^n (E_i E_j B_{ij} \sin \delta_{ij} + E_i E_j G_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (11)$$

根据以上分析, 可以用发电机的近似绝对动能增量 $\Delta E_{ik} = \Delta P_i \times t_c$ 作为控制敏感指标。要计算这一指标, 还需要一种特殊的潮流算法来计算短路期间的发电机不平衡功率。

2 基于叠加定理的加速功率快速估算方法研究

短路故障会造成能量“堵塞”在发电机上。对短路期间发电机加速功率进行积分, 就可以得到发电机短路期间的绝对动能增量, 该动能增量对失稳

模式有着巨大影响。通过数字仿真,可以得到较为准确的动能增量,但数字仿真耗时较多,难以在短时间内对大量预想故障进行快速扫描。在本节中,提出一种根据叠加原理计算短路期间电流的方法,对故障期间发电机加速功率做快速估算,从而实现绝对动能指标的快速估算。

电力系统三相短路期间的潮流无法直接用常规的潮流算法,如牛顿-拉夫逊迭代、PQ分解法等直接进行计算。但考虑到以下两点:

- 1) 短路节点电压降为0;
- 2) 发电机内节点电势不变。

可以用一种基于叠加原理的方法对短路期间潮流进行估算。

根据叠加原理,将故障中的网络状态看成是两种情况的叠加^[8]。一种是事故前的稳定状态,即正常运行方式下潮流计算的结果,见图1(a);另一种是各个发电机电势均等于0,尽在故障点D加一电势,该电势刚好与正常情况下故障点D的电压 \dot{V}_d 相等,但极性相反,如图1(b)所示。

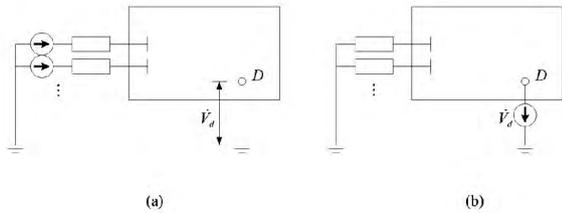


图1 叠加原理的应用

当两种情况叠加时,刚好让故障点D的电压在单相图中等于0,即相当于三相短路。按第2种情况计算所得的各节点电压就是短路时短路点等效电势造成的故障分量,与第1种情况的计算结果叠加,就可以得到故障期间的节点电压。

当采用叠加原理计算故障期间节点电压时,已知故障点在短路前的电压为 $\dot{V}_d^{(0)}$,根据故障点D的自阻抗 Z_{dd} ,就可求出故障点的短路电流为

$$\dot{I}_d = -\frac{\dot{V}_d^{(0)}}{Z_{dd}} \quad (12)$$

取注入节点电流为电流正方向,所以在式(12)中去负值,再将上式求得的故障点短路电流作为唯一的非0电流元素代入网络方程可得

$$Z \cdot \dot{I} = \dot{V} \quad (13)$$

由故障点短路电流在各节点产生的电压分量为

$$\dot{V}_{i(d)} = -\frac{\dot{V}_d^{(0)}}{Z_{di}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

式中 Z_{di} 为短路点D与节点i之间的互阻抗。将这一电压分量与故障前该节点的电压分量 $\dot{V}_i^{(0)}$ 相加,即得到短路故障期间的节点电压为

$$\dot{V}_i = V_i \angle \theta_i = \dot{V}_i + \dot{V}_{i(d)} \quad (15)$$

按以上方法计算出故障期间发电机机端电压,则可估算出故障期间发电机加速功率,发电机采用E恒定的二阶模型,根据稳态潮流,可以计算出故障前发电机内电势为

$$\dot{E}_i = E_i \angle \delta_i = \dot{V}_i + jX_i \dot{I}_i \quad (16)$$

式中 \dot{I}_i 为稳态电流,可以表示为

$$\dot{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\dot{V}_i^*} \quad (17)$$

式中 P_i 、 Q_i 为稳态时发电机的有功功率和无功功率。基于短路瞬间发电机功角不会发生突变,且E恒定,可估算发电机故障期间的电磁功率为

$$P_{is} = \frac{E_i V_i}{X_{di}} \sin(\delta_i - \theta_i) \quad (18)$$

假设故障期间机械功率保持恒定,则发电机故障期间不平衡为

$$\Delta P_i = P_{is} - P_i \quad (19)$$

通过上节研究可知,根据短路期间的不平衡加速功率大小,能够很快地确定控制敏感点在哪里,这对于切机地点和切机量的选择是非常有利的。

3 不平衡功率快速估算的算法实现

3.1 负荷和发电机支路的处理

上节给出的是不平衡功率估算的基本算法,要实现这一算法,还有一些具体问题需要解决。首先是对负荷的处理,负荷折算成阻抗归入节点导纳矩阵中。假设一个有N个节点的电力系统,节点1~n为发电机节点,节点n+1~N为其他节点。负荷对应的阻抗为

$$y_{li} = \frac{P_{li} - jQ_{li}}{|V_i|^2} \quad i=n+1, \dots, n+N \quad (20)$$

式中: $P_{li} + jQ_{li}$ 为节点i的负荷; $|V_i|$ 为节点i的电压幅值。对发电机节点采用相同的处理方式,发电机支路的导纳为

$$y_{gi} = 1/(R_i + jx_{di}) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (21)$$

网络的节点导纳矩阵如式 (19) 所示。

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ N-n \end{matrix} \quad (22)$$

现在将负荷和电机支路归入节点导纳矩阵中。新的节点导纳矩阵为

$$Y_D = \begin{bmatrix} y + Y_1 + y_{lg} & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 + y_{ll} \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ N-n \end{matrix} \quad (23)$$

式中:

$$y_{lg} = \text{Diag}(y_{gi}) \quad i = 1, \dots, n$$

$$y_{ll} = \text{Diag}(y_{li}) \quad i = n+1, \dots, N$$

阻抗矩阵可通过求逆得到

$$Z_D = Y_D^{-1} \quad (24)$$

3.2 算法流程

加速功率估算流程如图 2 所示。

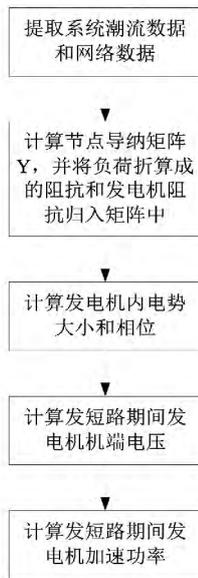


图 2 算法流程

4 算例分析

为验证所寻找的最优切机方法,采用 10 机 39 节点系统进行仿真分析,如图 3 所示。假设在母线 16 上发生三相短路故障,0.12 s 后切除故障线路 16 至 17。

表 1 节点 16 短路时的不平衡功率

节点	30	31	32	33	34
$\Delta P / \text{MW}$	416	271	367	579	407
节点	35	36	37	38	39
$\Delta P / \text{MW}$	618	497	245	416	142

如果不进行紧急控制,系统将在第一个临界失步,其功角曲线如图 4 所示。按照所提出的方法,对故障期间加速功率计算,得到各台发电机加速功率如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,节点 33、35 和 36 的发电机加速功率最大。所以,可以初步确定切机控制敏感点位于这 3 个节点。在节点 35 和 36 分别切除容量 100 MW 的机组能取得良好效果,可以保持系统稳定。其功角曲线如图 5 所示。

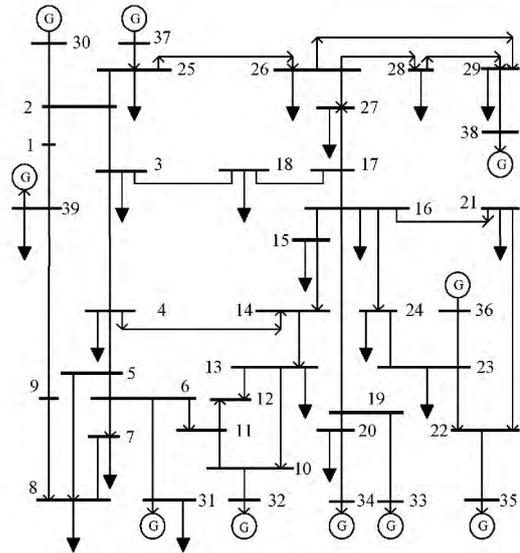


图 3 10 机 39 节点系统

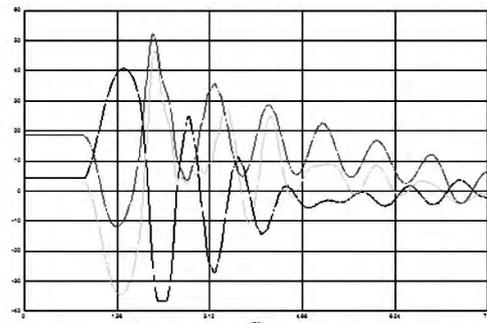


图 4 无紧急控制时的功角曲线

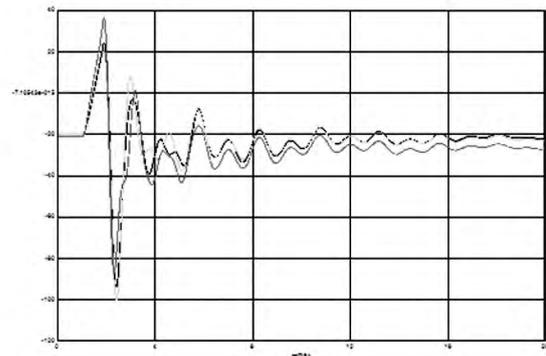


图 5 有紧急控制时的功角曲线

5 结 论

提出一种短路期间不平衡功率的计算方法。该方法基于叠加定理,认为故障中的电网电压由正常运行中的系统电压 和一个位于短路点、大小相位与事故前电压相同但极性相反的电源产生的电压叠加而成。计算得到机端电压后可计算出发电机不平衡功率,根据该不平衡功率可初步确定切机控制敏感点。最后在 IEEE 10 机 39 节点仿真模型上验证了该方法的正确性和有效性。

参考文献

[1] 薛禹胜,毛雪雁. 用 EEAC 法实现快关和切机[J]. 电力系统自动化,1993,17(12): 14-21.

[2] Stanton S E, Dykas W P. Analysis of a Local Transient Control Action by Partial Energy Functions [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 1989, 4(3): 996-1002.

[3] Stanton S E, Slivinsky C, Martin K, et al. Application of Phasor Measurements and Partial Energy Analysis in Stabilizing Large Disturbances [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 1995, 10(1): 297-306.

[4] 任伟,房大中,陈家荣,等. 基于最优控制原理的电力系统紧急控制及应用[J]. 电网技术,2009,33(2): 8-13.

[5] 李函,吴京涛. ΔP 积分作为暂稳控制切机启动判据的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),1997,37(7): 93-96.

[6] 闵勇,李函,林姿峰. 转子绝对动能增量及其在失稳模式判别中的应用[J]. 清华大学学报:自然科学版,

2003,43(9): 1161-1164.

[7] 闵勇,李函,林姿峰. 基于绝对动能增量的扩展 0-1 规划在线准实时决策算法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(3): 5-9.

[8] 西安交通大学,清华大学,浙江大学等合编. 电力系统计算[M]. 北京:水利电力出版社,1978.

[9] 方勇杰,范文涛,陈永红,等. 在线预决策的暂态稳定控制系统[J]. 电力系统自动化,1999,23(1): 8-11.

[10] 朱江川,薛禹胜. 关于孤立稳定域的一个实例[J]. 电力系统自动化,1997,21(2): 27-31.

[11] 檀斌,薛禹胜. 多机系统混沌现象的研究[J]. 电力系统自动化,2001,25(2): 3-8.

[12] 郭琦,赵晋泉,张伯明. 基于 OMIB 的孤立稳定现象研究[J]. 电力系统自动化,2005,29(19): 14-18.

[13] 方勇杰. 用紧急控制降低由输电断面开断引发系统崩溃的风险对印度大停电事故的思考[J]. 电力系统自动化,2013,37(4): 1-5.

[14] 汤涌,卜广全,易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25): 167-174.

[15] 李碧君,许剑冰,徐泰山,等. 大电网安全稳定综合协调防御的工程应用[J]. 电力系统自动化,2008,32(25): 25-30.

作者简介:

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),助理工程师,主要研究方向为电网规划设计、电力系统分析与稳定;

余婧峰(1988),助理工程师,主要研究方向为电网规划设计、电力系统分析与稳定;

张国芳(1985),工程师,主要研究方向为电力调度自动化。
(收稿日期:2015-07-13)

(上接第24页)

[10] 文明浩,陈德树,吴伯华,等. 绝缘地线间隙放电对距离保护影响的研究[J]. 继电器,2000,29(10): 25-27.

[11] 李本良,袁兆祥,惠旭,等. 降低高压交流输电线路地线损耗的运行方式[J]. 电网技术,2011,35(3): 98-102.

[12] 毋金涛,盛戈睐,曾奕,等. 输电线路在线监测装置供电电源的设计[J]. 电工技术,2009,35(2): 33-35.

[13] 刘亚东,盛戈睐,王又佳,等. 基于功率控制法的电流互感器取电电源设计[J]. 电力系统自动化,2010,34(3): 70-74.

[14] Yamaguchi T, Takano S, Naganuma O, et al. Development of Power Supply System for Obstruction Lights Exploiting Induced Current Which Flows Through Overhead Ground Wires [C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition 2002: Asia Pacific IEEE/PES, 2002: 2176-2180.

[15] R. L. Vasquez-Arnez, M. Masuda, J. A. Jardini, et al. Tap-off Power from the Overhead Shield Wires of an HV Transmission Line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 986-992.

(收稿日期:2015-04-22)