

考虑电磁功率突变的闭环紧急控制

张雪焱, 黄少锋

(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, 北京 102206)

摘要: 提出一种考虑电磁功率突变的暂态稳定闭环紧急控制方案。现有的闭环紧急控制方案都没有考虑切机操作使发电机电磁输出功率发生突变这一现象, 可能导致计算出的切机量不足。本方案在计算出切机量后并不立即实施控制, 而是增加了切机量校验环节, 预测按此切机量实施控制后的系统能否恢复稳定, 如不稳定则对切机量加以修正。按照最终算出的切机量对系统实施控制, 并对系统进行闭环监控, 直至系统稳定。本方案可使对系统的切机控制更加精确, 改善了闭环紧急控制的效果。仿真计算表明本方案是可行的。

关键词: 暂态稳定; 闭环紧急控制; 电磁功率突变; 切机

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)10-0027-05

0 引言

暂态稳定紧急控制是我国电网“三道防线”体系中的重要环节, 也是保证大电网安全运行的有效措施。紧急控制是电力系统在紧急状态下, 通过采取适当的措施, 使电力系统恢复到正常状态或者暂时进入恢复状态的控制^[1]。紧急控制按照控制方式可分为两类: 开环控制和闭环控制^[1]。开环控制方式基于故障发生前离线或在线生成的控制决策表, 当发生故障时根据系统的状态在决策表中搜索相匹配的控制策略并输出, 控制过程结束。目前在工程实际当中采用的“离线预决策, 实时匹配”和“在线预决策, 实时匹配”都是开环控制。这类方案的优点是动作速度很快, 而且技术比较成熟, 但其控制决策表都是基于预想事故事先形成的, 难以涵盖所有的故障情况, 尤其是复杂的连锁故障。当不合适的控制措施导致系统失去稳定时, 就只能依靠第三道防线将系统解列。闭环控制方式是当系统发生故障后根据广域同步相量测量单元 (PMU) 采集的数据进行实时暂态稳定分析和控制, 在实施紧急控制措施后继续监视系统的动态, 在必要时实施新的控制措施, 直至系统稳定。闭环控制不制定策略表, 而是完全根据系统的运行状态和故障类型进行超实时地计算, 不存在失配问题。因此这种方法更具合理性, 是暂态稳定紧急控制的发展方向。

扩展等面积准则 (EEAC) 理论是目前广泛使用的暂态稳定分析与决策方案。由于与时域仿真法和其它各种直接法相比, 其突出的优点是速度特别快, 因此现有的闭环紧急控制方案^[1~6]大都建立在 EE-

AC理论的思想基础上。文献 [5] 建立了含控制项的电力系统紧急控制模型, 基于系统实际受扰轨迹用 EEAC 方案对含控制项的多机系统降阶等值, 并应用广义 Hamilton 理论能量控制方案进行等值受控电力系统稳定分析, 在此基础上提出一种基于实时量测数据的闭环暂态稳定紧急控制方案。文献 [6] 提出了紧急 EEAC 的概念, 利用 PMU 实时信息和 EEAC 的思想快速进行暂态稳定预测和分析, 并指出暂态稳定实时控制的实质是对电力系统进行闭环的滚动控制。

当对系统实施切机控制时, 各发电机的电磁输出功率都会发生突变, 导致映象 OM B (One Machine Infinite Bus) 系统的电磁功率随之产生突变。现有的闭环紧急控制方案在计算控制量时都没有考虑这一现象, 这有可能使计算出的切机量偏小, 从而导致受控后的系统无法恢复稳定。

针对这种情况, 本文提出一种考虑电磁功率发生突变的闭环紧急控制方案。系统发生故障后, 首先根据 PMU 提供的实时数据预测系统稳定性, 如系统不稳定, 则计算切机量。然后辨识出切机后系统收缩到发电机内节点的导纳矩阵, 由此对各发电机发生突变后的受扰轨迹进行预测。在预测轨迹聚合得到的映象系统中判断切机量是否足够, 如果不够, 则增加切机量重新校验。按照最终算出的切机量对系统实施控制, 并对系统进行闭环监控, 直至系统稳定。在新英格兰 10 机 39 节点系统上所做的仿真实验说明本方案是可行的。

1 暂态稳定性快速预测

设发电机采用经典二阶模型, 负荷采用恒定阻

抗模型,忽略原动机、调速系统及励磁系统动态。将负荷阻抗和发电机直轴暂态电抗 X_d 都归入节点导纳阵,并且节点导纳阵消去负荷节点和网络节点,而只剩 X_d 后的发电机内节点。则一个 n 机系统的第 i 台机可描述为:

$$M_i \ddot{\delta}_i = P_{mi} - P_{ei} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: M_i 为发电机惯性时间常数, δ_i 为转子角, P_{mi} 为恒定机械功率。电磁功率 P_{ei} 满足下式:

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n E_i E_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (2)$$

其中: $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$, E_i 为 X_d 后的恒定内电势, $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ 为收缩到发电机内节点的降阶导纳矩阵 Y 中元素,在网络有故障或操作时其值会发生变化。

本文方案仅需在各发电机节点装设 EMU,当多机系统发生故障后,EMU 将这些节点的转子角 δ_i 和电磁功率 P_{ei} 传输至控制中心用于计算。故障清除后,计算发电机转子角 δ_i 在故障清除时刻 t_{cl} 对各阶导数,并应用泰勒级数展开预测 $t_{cl} + t$ 时刻的发电机转子角:

$$\begin{aligned} \delta_i(t_{cl} + t) &= \delta_i(t_{cl}) + \dot{\delta}_i(t_{cl}) \cdot t + \frac{1}{2} \ddot{\delta}_i(t_{cl}) \cdot t^2 \\ &+ \frac{1}{6} \dddot{\delta}_i(t_{cl}) \cdot t^3 \quad (t < 1 \text{ s}) \end{aligned} \quad (3)$$

将各机轨迹按转子角大小排序,确定相邻转子角间的最大间隙。则转子角位于角度间隙上方的各发电机组成临界机群 S ,其它发电机组成剩余机群 A 。采用互补群惯量中心-相对运动(CCCOI-RM)变换^[7]对系统进行降维等值。首先等值为双机系统:

$$\begin{cases} M_s = \sum_{i \in S} M_i, \quad s = M_s^{-1} \sum_{i \in S} M_i \delta_i \\ M_a = \sum_{j \in A} M_j, \quad a = M_a^{-1} \sum_{j \in A} M_j \delta_j \end{cases} \quad (4)$$

再进行 OM B 系统等值:

$$\begin{cases} M = M_s M_a / (M_a + M_s) \\ P_m = M^{-1} (M_a \sum_{i \in S} P_{mi} - M_s \sum_{j \in A} P_{mj}) \\ P_e = M^{-1} (M_a \sum_{i \in S} P_{ei} - M_s \sum_{j \in A} P_{ej}) \end{cases} \quad (5)$$

由此得到映象 OM B 系统的数学模型:

$$M \ddot{\delta} = P_m - P_e = P + A \cos \delta + B \sin \delta \quad (6)$$

未知参数 P, A 和 B 由 m 组 ($m \geq 5$) 实时数据通

过最小二乘法得到。将其代入式 (6),便可得到预测的 $P_e - \delta$ 曲线^[6],见图 1。其中故障清除后的 $P_e - \delta$ 曲线的实线部分为实测值,虚线部分为预测值。得到 $P_e - \delta$ 曲线后利用等面积定则进行稳定性判断。

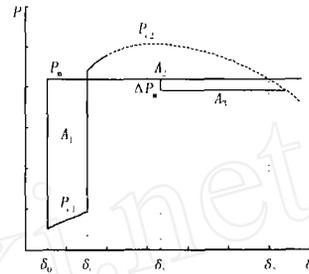


图 1 在映象 OM B 系统中预测稳定性

Fig 1 Predicting the stability in the equivalent OM B system

动能增加面积:

$$A_1 = \int_0^{\delta_1} (P_m - P_{e1}) d\delta \quad (7)$$

动能减少面积:

$$A_2 = \int_0^{\delta_2} (P_{e2} - P_m) d\delta \quad (8)$$

若 $A_1 < A_2$,则系统首摆稳定,这种情况下应继续闭环监视系统后续各摆的动态行为,防止发生多摆失稳。若 $A_1 > A_2$,则系统将失稳,此时需要对系统进行控制。考虑采用切机作为控制措施,计算出切机量 P_m ,使得新增的动能减少面积 $A_3 = A_1 - A_2$ 。切机的控制量分别按临界机群中各机组的出力进行分配,被控对象按临界机群中由大到小的顺序依次执行^[6]。

2 切机量校验方案

如果判断系统失稳需要实施切机控制,则控制后收缩到发电机内节点的降阶导纳矩阵 Y 会发生变化。由式 (2) 可见,这将导致各发电机电磁输出功率发生突变,相应的 OM B 映象中的 $P_e - \delta$ 曲线也会随之突变。另外,由于切机操作导致临界机群的惯性时间常数 M_s 减小,由式 (5) 可知即使各发电机的电磁功率不突变,OM B 映象中的 P_e 仍然会发生突变。切机控制对 OM B 映象曲线的影响可见图 2。图中转角 δ_s 对应切机时刻,虚线部分 P_{e2} 为预测的电磁功率,而 P_{e3} 为切机后实测的电磁功率。显然,切机时刻电磁功率的突变会使实际的动能减少面积小于计算出的动能减少面积,从而使切机量偏小。仅当控制量相对系统总容量足够小时,忽略这

一突变因素才不会引起较大误差。因此,有必要对切机后突变的 $P_e -$ 曲线进行预测,重新计算动能减少面积,校验切机量是否满足要求。

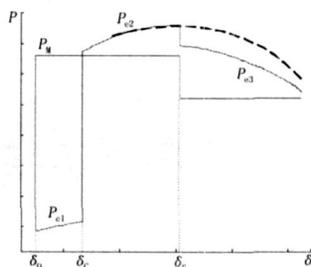


图 2 实施切机控制时映象 $P_e -$ 曲线发生突变

Fig 2 The abrupt change of $P_e -$ curve occurs with generator tripping

2.1 降阶导纳阵的求取

预测 $P_e -$ 曲线之前,首先需求出切机后收缩到发电机内节点的降阶导纳矩阵(记为 Y_A)。记以各发电机出口为节点的降阶导纳阵为 Y_B ,由 Y_B 表示的网络如图 3 所示。不失一般性,设实施切机控制的机组编号为 $1 \sim j$ 。切机时在网络中只有受控机组的暂态电抗 $x_{d1} \sim x_{dj}$ 发生变化,故切机前后 Y_B 是不变的。因此,可以在进行第 1 节所述的稳定性快速预测的同时采用最小二乘法辨识出 Y_B 。在确定切机量后可得到 $x_{d1} \sim x_{dj}$ 的新值。对图 3 的网络采用星-网变换消去各发电机的出口节点,而只保留发电机内节点,则变换后的导纳阵即为 Y_A 。

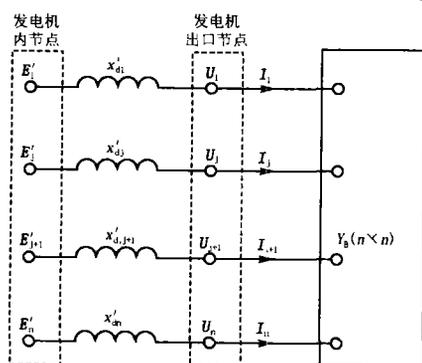


图 3 用于求解降阶导纳阵 Y_A 的网络

Fig 3 The network used to solve down-step admittance matrix Y_A

2.2 校验切机量

将 Y_A 代入式(2),并采用数值积分计算由式(1)~(2)组成的微分代数方程组,可以精确地得到各发电机的转子角 δ_i 和电磁功率 P_{ei} ,实现受扰轨迹的超实时预测。微分方程的求解采用成熟的、计

算速度快的算法,如改进欧拉法^[8]。在保证数值稳定性的前提下采用较大的计算步长可以进一步提高计算速度。对预测得到的受扰轨迹重新进行临界机群识别,并按式(4)~(5)聚合,获得映象 $P_{e3} -$ 曲线。在图 2 中利用 P_{e2} 和 P_{e3} 重新计算动能减少面积,并作出稳定性预测,判断系统是否稳定。如系统将失稳,说明切机量不足,此时应增加切机量,再重复上述计算步骤,直至切机量足以使系统稳定。按照最终算出的切机量对系统实施控制,并利用不断更新的 PMU 数据对系统连续进行监视、预测与控制,直至系统稳定。

闭环紧急控制的流程见图 4。

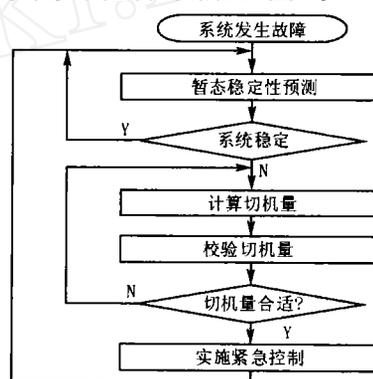


图 4 闭环紧急控制流程

Fig 4 Flow chart of closed-loop emergency control scheme

3 算例分析

本文方案在新英格兰 10 机 39 节点系统^[9]上进行了仿真测试,系统接线图如图 5 所示。

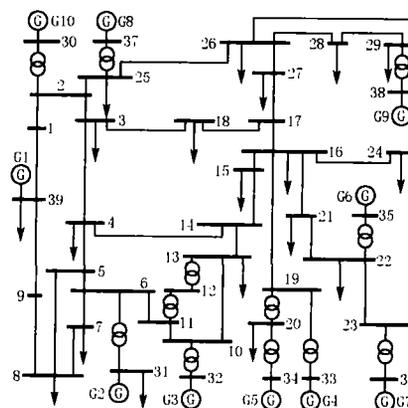


图 5 新英格兰 10 机 39 节点系统接线图

Fig 5 New-England 10-generator 39-bus system

考虑母线 26 和母线 29 之间线路 50% 处发生三相短路故障,0.118 s 后切除故障线路。通过数值仿真可看到系统将失稳,各发电机摇摆曲线见图 6。

通过临界机群识别可知临界机群为 9 号发电机,其余各机组成剩余机群。将 EMU 实时数据通过降阶映射,得到映象 OMB 系统,其 P_c - 曲线见图 7。

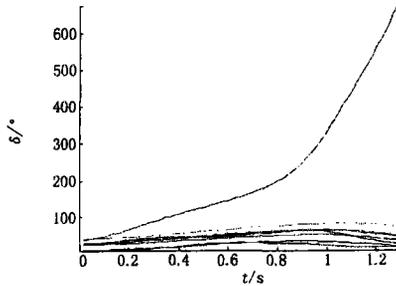


图 6 系统故障后的发电机摇摆曲线

Fig 6 Swing curves of the post-fault system

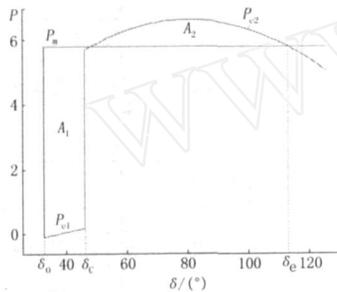


图 7 系统故障后的 P_c - 曲线

Fig 7 The P_c - curves of the post-fault system

假设在故障清除后 150 ms 实施切机控制,求得切机量应为 107.2 MW。这相当于临界机群总输出功率的 18.5%。假设系统中每个机组由 5 台相同的发电机组成,于是切机量应为 9 号机的 20%,即应切除其中一台发电机。

在实施控制之前首先对这一结果进行校验。采用改进欧拉法进行数值积分预测出切机后各机组的受扰轨迹,再等值为 OMB 系统,见图 8。可见切除一台机后系统仍然失稳。这正是由于切机时 P_c 突然减小,使动能减少面积的实际值小于计算值,从而导致了算出的切机量不足。

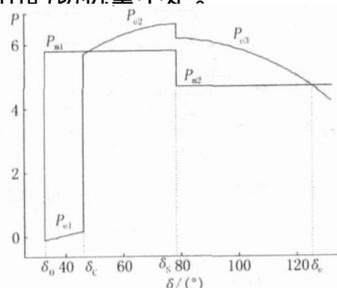


图 8 用于校验切机量的 OMB 映象

Fig 8 The OMB image used to verify generator tripping value

将切机量增加为 2 台,再次进行校验,可知切机量满足要求,可以对系统实施控制。切机后发电机摇摆曲线见图 9,控制后系统恢复稳定。

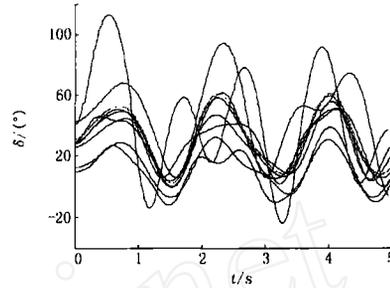


图 9 切除 2 台机后的发电机摇摆曲线

Fig 9 The swing curves of the post-fault system after tripping 2 generators

4 结论

本文对闭环紧急控制方法做了进一步地研究,提出一种考虑电磁功率突变暂态稳定闭环紧急控制方案。针对现有方法的不足提出增加切机量校验环节,从而保证控制措施的正确性。本方案计算量小,概念清楚,可使对系统的切机控制更加精确,改善闭环紧急控制的效果。仿真计算证明了本方案的可行性。

参考文献:

- [1] 范文涛,薛禹胜. 电力系统紧急控制 [J]. 继电器, 1998, 26 (3): 52-55.
FAN Wen-tao, XUE Yu-sheng Power System Emergency Control [J]. Relay, 1998, 26 (3): 52-55.
- [2] RU IZ-VEGA D, GLAV ICM, ERNST D. Transient Stability Emergency Control Combining Open-loop and Closed-loop Techniques [A]. Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting Canada: 2003.
- [3] ERNST D, PAVELLA M. Closed-loop Transient Stability Emergency Control [A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Singapore: 2000.
- [4] LI Yi-qun, TENG L in, LU Wan-shun, et al The Study on Real-time Transient Stability Emergency Control in Power System [A]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering Canada: 2002.
- [5] 彭疆南,孙元章,程林. 基于受扰轨迹的紧急控制新方案. 电力系统自动化, 2002, 26 (21): 17-22.
PENG Jiang-nan, SUN Yuan-zhang, CHENG L in A Novel Approach for Transient Stability Emergency Control Based on Perturbed Trajectory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (21): 17-22.

- [6] 滕林,刘万顺,俞志皓,等. 电力系统暂态稳定实时紧急控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 64-69.
TENG Lin, LU Wan-shun, YUN Zhi-hao, et al Study of Real-time Power System Transient Stability Emergency Control[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 64-69.
- [7] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论 非自治非线性多刚体系统的稳定性分析[M]. 南京:江苏科技出版社, 1999.
XUE Yu-sheng Quantitative Study of General Motion Stability and an Example on Power System Stability[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1999.
- [8] 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.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin The Theo-
- ries and Analysis of Dynamic Power Systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [9] 傅书遒,倪以信,薛禹胜. 直接法稳定分析[M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
FU Shu-ti, NI Yi-xin, XUE Yu-sheng Stability Analysis Using Direct Method[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.

收稿日期: 2005-10-20; 修回日期: 2005-12-21

作者简介:

张雪焱(1975-),男,博士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: power_system@126.com

黄少锋(1958-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护与控制。

Closed-loop emergency control method considering the abrupt change of electromagnetic power

ZHANG Xue-yan, HUANG Shao-feng

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control of North China Electric Power University under Ministry of Education, Beijing 102206, China)

Abstract: A transient stability closed-loop emergency control method considering the abrupt change of electromagnetic power is proposed. The fact that the electromagnetic power will change abruptly when tripping generators is not considered in published papers, which might cause an insufficiency of tripping value. In this paper, the control is not taken into effect immediately after the tripping value is calculated. Instead, a verifying method of tripping value is implemented. The stability of the power system after tripping generators is estimated, and the tripping value is modified if necessary. After controlling the system by the verified generator tripping value, the system is under closed-loop supervision and control to stability. More precise control can be acquired using this method, and the effect of closed-loop emergency control is improved. The study is supported by simulating experiment with reasonable results.

Key words: transient stability; closed-loop emergency control; abrupt change of electromagnetic power; generator tripping

(上接第 3 页 continued from page 3)

- [7] 张太升,鄢安河,等. 关于 500 kV 牡郑线的绝缘地线对零序参数影响的研究[J]. 继电器, 2001, 29(3): 27-31.
ZHANG Tai-sheng, YAN An-he, et al Study on the Effect of Insulation to Earth on Zero Sequence Parameters in 500 kV[J]. Relay, 2001, 29(3): 27-31.
- 作者简介:
- 潘露(1983-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护; E-mail: panlu94395771@tom.com
- 吕艳萍(1955-),女,教授,主要从事电力系统继电保护方面的教学与研究;
- 于芳(1983-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

收稿日期: 2005-11-07; 修回日期: 2005-12-07

Influence on ground distance protection due to the composite impedances

PAN Lu, Lü Yan-ping, YU Fang, WANG Han-bin

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to reduce the power loss of OPGW installed tower-by-tower, composite impedances are installed between OPGW and ground. After analyzing the influence on zero-sequence parameters due to the composite impedances, this paper points out that the ground distance protection will be influenced as a result of the numbers of composite impedance switched on. Then a measure is put forward in order to reduce the influence. Finally, the analysis result has been proved satisfactory by a real 220 kV system.

Key words: composite impedance; OPGW; zero-sequence impedance; ground distance protection