

发电机励磁系统调节参数对电力系统 动态电压稳定的影响

何开教, 方鸽飞*, 刘 荣

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:电力系统电压稳定问题的本质是动态稳定问题, 感应电动机、热载负荷等负荷特性对电压稳定有重要影响。发电机是电力系统最重要的动态无功源, 发电机励磁系统的快速励磁能力是预防系统电压失稳的重要保障。为从电源侧出发研究发电机励磁系统调节参数对系统动态电压稳定的作用, 详细分析了发电机励磁系统调节参数对发电机的快速励磁能力和动态电压支撑能力的影响。最后, 应用 PSAT 仿真软件对 IEEE14 节点系统进行了仿真计算。研究表明, 发电机励磁系统调节参数对保持电力系统动态电压稳定的具有重要作用。

关键词:电力系统; 动态电压稳定; 电压失稳; 动态无功源

中图分类号: TM744

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)01-0094-03

Study of generator excitation system regulator parameters affecting power system dynamic voltage stability

HE Kai-jiao, FANG Ge-fei, LIU Rong

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Power system voltage stability is a dynamic stability problem, induction motors and thermal control loads etc., these dynamic loads have great impacts on the voltage stability. Generators are the most important dynamic reactive sources of the power system, and their quick exciting ability of their excitation system can effectively prevent the voltage instability. In order to study the dynamic voltage stability problem from the generator side, the regulator parameters affecting the quick exciting ability of excitation system and the dynamic voltage support ability of generator were exactly analyzed. At last, the simulation of IEEE14 node system was done, using the PSAT analysis tool. The results verify that the regulator parameters of the generator excitation system have important effects on keeping the power system dynamic voltage stability.

Key words: power system; dynamic voltage stability; voltage instability; dynamic reactive source

0 引 言

电力系统是一个规模庞大、结构复杂的非线性动态系统, 其稳定性研究一直是电力系统规划与运行的重要课题。从上个世纪 70 年代开始, 世界各地发生了多起由电压崩溃导致的大停电事故, 造成巨大的经济损失, 电力系统的电压稳定性问题日益突出, 已经成为人们最为重视的稳定问题^[1-4]。

早期, 人们将电压稳定问题归为静态稳定问题, 认为系统的动态不是主要的影响因素, 从而以平衡点的存在性问题来研究电压稳定问题, 研究方法主要集中在以潮流计算为工具的静态方法上, 主要的分析方法有奇异值分解法、灵敏度法、潮流多解法、直接法和连续潮流法等。利用静态电压稳定分析可以计算得到系统的临界功率、临界电压和负荷裕度等判断系统电压稳定程度的指标。随着人们对电压崩溃的机理的深入探索研究, 发

收稿日期: 2011-07-25

作者简介: 何开教 (1985-), 男, 福建三明人, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究。E-mail: kjhe_zju@126.com

通信联系人: 方鸽飞, 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: eefanggefei@zju.edu.cn

现电压稳定问题的本质是一个动态稳定问题,发电机及其控制系统、负荷特性、无功补偿装置、有载调压变压器、直流输电设备以及新型电力电子装置等元件的动态特性对电压稳定有很大的影响。因此,动态电压稳定性分析是基于微分-差分-代数方程组 (DDAE),用于分析动态电压稳定方法主要有时域仿真法、动态潮流法和能量函数法^[5-9]。如何判断动态元件对动态电压稳定的影响,并采用适当的控制措施以提高系统电压稳定程度,是动态电压稳定问题研究的关键。

目前,防止电压失稳的措施可以归为 3 类:预防控制、校正控制和紧急控制。预防控制是在扰动并未发生时就作用,从而将系统的工作点向稳定域内部移动的一种措施。其主要研究的问题是无功优化,包括确定无功功率补偿容量和无功补偿设备的运行方式,即以最经济的方式重新分布系统无功潮流来提高系统电压稳定。紧急控制的主要手段有低压切负荷和低频切负荷,切负荷是防止电压崩溃的有效手段,却是不希望看到的。校正控制通过调整电压/无功控制设备的可控参数,包括发电机及其控制系统和 SVC 等无功补偿设备,重新确定无功功率调度方案,提高电压稳定性,预防电压失稳。

电力系统遭受扰动后,发电机励磁系统根据机端电压变化,自动调节励磁电流使发电机端电压维持在给定的水平,从而提高电力系统的电压稳定程度,发电机的励磁系统是提高电力系统电压稳定性最有效和最经济的控制手段^[10-11]。鉴于发电机的动态电压支撑能力对电力系统的动态电压稳定影响很大,笔者深入研究发电机励磁系统调节参数对电力系统动态电压稳定的影响。

1 动态电压稳定分析的数学模型

电力系统是复杂的非线性动态系统,其电压稳定性分析需要考虑系统的动态元件和离散元件的共同作用。考虑发电机励磁系统调节参数对动态电压稳定分析的数学模型可由一组微分-差分-代数方程组 DDAE 来描述:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X, Y, Z_c, Z_d) \\ 0 = g(X, Y, Z_c, Z_d) \\ \dot{Z}_c = h_c(X, Y, Z_c, Z_d) \\ Z_d(k+1) = g(X, Y, Z_c, Z_d(k)) \end{cases} \quad (1)$$

式中: Z —长期动态变量, Z_c —连续变量, Z_d —离散变量, X —动态状态变量, Y —代数变量。

时域仿真分析方法是准确、有效的方法,本研究利用 PSAT 分析软件来研究分析发电机励磁系统调节参数对系统动态电压稳定的作用。

2 发电机及其励磁控制系统

2.1 发电机功率

从根本上讲,并联电容器、SVC 等无功补偿装置可视为与电压有关的无功负荷,电力系统的电压最终是由发电机来支撑。发电机的无功出力与机端电压密切相关,以机端电压为参考相量,则发电机视在功率表达式为:

$$\bar{S} = P + jQ = \dot{E}_q \wedge \dot{I} = \frac{E_q^2 - E_q U \cos \delta - j E_q U \sin \delta}{-j X_d} = \frac{E_q U}{X_d} \sin \delta + j \left[\frac{E_q^2 - E_q U \cos \delta}{X_d} \right] \quad (2)$$

其有功功率和无功功率表达式分别如下:

$$P = \frac{E_q U}{X_d} \sin \delta \quad (3)$$

$$Q = \frac{E_q^2 - E_q U \cos \delta}{X_d} \quad (4)$$

2.2 发电机励磁系统

发电机励磁系统按励磁电源不同,可以将其归为 3 类:直流励磁系统、交流励磁系统和静止励磁系统^[12]。

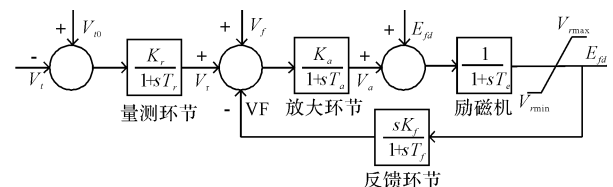


图 1 发电机励磁系统模型

励磁系统由励磁电源和控制装置构成,主要包括电压测量与负载补偿环节、励磁调节器、保护与限幅环节和主励磁系统各环节,是为发电机提供励磁电流的设备,是同步发电机的重要组成部分。电压测量与负载补偿环节测量发电机端电压并对负载电流进行补偿,励磁调节器对励磁电流进行调节和控制,保护与限幅环节用以确保机组的运行参数不超过其限值,主励磁系统为发电机的励磁绕组提供励磁电流。

3 算例仿真分析

3.1 仿真条件

本研究以 IEEE14 节点系统为研究对象,应用 PSAT 电力系统仿真软件进行时域仿真计算。同步发电机采用考虑阻尼绕组的次暂态变化 6 阶模型,励磁调节器采用可控硅励磁调节系统和电力系统稳定器 PSS。对负荷节点 10、11 和 14 采用 40% 感应电动机和 60% 恒功率负荷模型,仿真计算时,恒功率负荷以

恒阻抗来处理,系统其他模型和参数保持不变。假定系统在 $t = 1.0 \text{ s}$ 时线路 5-6 在靠近母线 5 处发生三相短路故障,故障持续时间为 0.1 s 。

对节点 6 的发电机励磁调节参数具体设置如下: 参数组 a : $k_a = 20$, $V_{r\max} = 3.5 \text{ p.u.}$ 。参数组 b : $k_a = 20$, $V_{r\max} = 5.0 \text{ p.u.}$; 参数组 c : $k_a = 50$, $V_{r\max} = 3.5 \text{ p.u.}$; 参数组 d : $k_a = 50$, $V_{r\max} = 5.0 \text{ p.u.}$ 。

3.2 发电机励磁系统调节参数对系统动态电压稳定的影响

根据前述的计算模型,系统在发生三相短路故障后,节点 6 发电机励磁系统调节参数对其励磁电压的影响如图 2 所示。节点 6 发电机无功功率变化曲线如图 3 所示,节点 6 短路故障期间无功功率-时间关系曲线如图 4 所示。

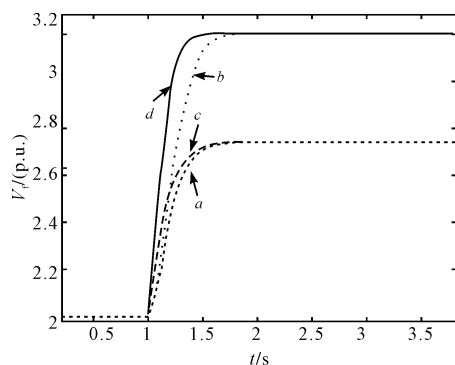


图 2 节点 6 励磁电压-时间关系曲线

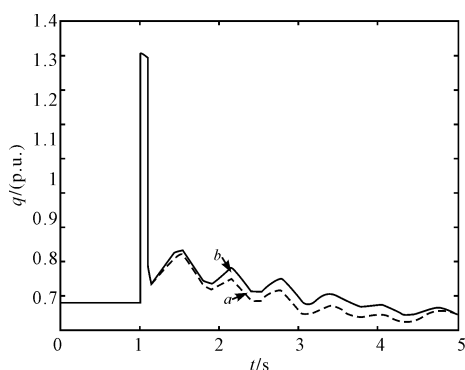


图 3 节点 6 发电机无功功率变化曲线

如图 2 所示, $V_{r\max} = 5.0 \text{ p.u.}$ 的参数组 b 和 d 的励磁电压上限值为 3.198 p.u. , $V_{r\max} = 3.5 \text{ p.u.}$ 的曲线 a 和 c 的励磁电压上限值为 2.741 p.u. 。曲线 d 比曲线 b 有较大的上升速度,且曲线 d 能快速达到励磁电压上限,曲线 c 的上升速度比曲线 a 的上升速度大。

如图 3,图 4 所示,参数组 b 的励磁电压顶值大,发电机的无功出力较大。故障期间,励磁参数为参数组 d 时,即 $k_a = 50$, $V_{r\max} = 5.0 \text{ p.u.}$, 比 a 组参数大,曲线 d 的发电机瞬时无功出力也比较大,对系统的动态无功支撑起更大的作用。

电压-时间关系曲线如图 5 所示。在 $t = 1.0 \text{ s}$

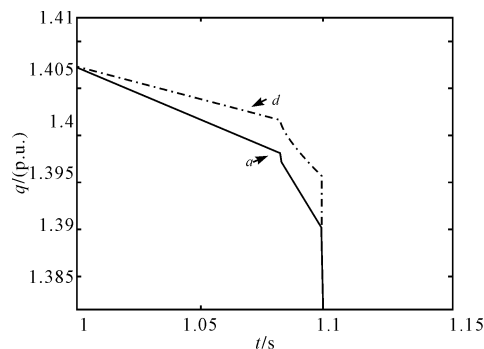


图 4 节点 6 短路故障期间无功功率-时间关系曲线

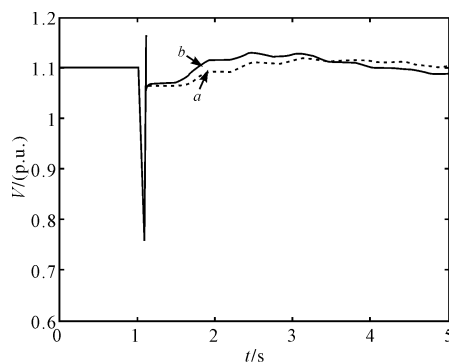


图 5 电压-时间关系曲线

时,系统发生三相短路故障,而后节点 14 的电压急剧下降;在 $t = 1.1 \text{ s}$ 切除短路故障后,节点 14 的电压得到恢复。参数组 d 的节点 14 的电压幅值上升较快,使系统电压快速得到恢复。

从上面的分析可以得出:励磁系统的励磁放大倍数参数较大时,其励磁电压有较高的爬坡率,使励磁电压快速上升,发电机的无功出力快速增加。励磁系统的励磁电压顶值参数较高时,其能达到的励磁电压幅值也比较大,从而使发电机的无功出力快速增加,发电机的无功出力较大,可强有力地加快故障后节点电压的恢复,改善电力系统的动态电压稳定水平。

3.3 励磁系统调节参数对短路故障极限切除时间的影响

系统仿真计算条件不变,在 $t = 1 \text{ s}$ 时,线路 5-6 在靠近母线 5 处发生三相短路故障,在电力系统保持电压稳定情况下,不同励磁系统调节参数对短路故障极限切除时间的关系如表 1 所示。

由表 1 可知,高的励磁电压顶值能提高极限切除时间,延缓系统崩溃的时间;大的励磁放大倍数对提高故障极限切除时间有较大作用。

表 1 励磁参数对短路故障极限切除时间的关系

参数组别	参数组 a	参数组 b	参数组 c	参数组 d
极限切除时间	0.128 s	0.130 s	0.141 s	0.145 s

(下转第 103 页)

该结果在表 1、表 2 作为已知,通过商业软件 Halcon 设计编写相应标定程序进行验证,验算结果与表 3 对比误差为 0.035 1,证明了该算法的有效性和正确性。

5 结束语

通过 PSO 算法,本研究能快速优化出摄像机标定过程外参,并通过矩阵转换计算出靶体模型的位姿。在应用时,可以设计循环程序直接计算出每次的姿态并能达到一定精度,本研究提出的 PSO 优化算法可以直接确定摄像机外参,即靶板相对摄像机的初始位姿的确定。同时对汽车车轮定位、航天航空等领域位置及姿态的测量提供了理论依据,具有重要的参考价值。

参考文献 (References):

- [1] 王春雷,朱 劲. 一种非线性摄像机标定方法[J]. 电脑知识与技术,2008,4(7):1728-1729,1732.
- [2] 沈慧杰. 基于单目视觉的摄像机定位方法的研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2009.
- [3] 曾建兰. 摄像机标定若干问题的研究[D]. 上海: 华东师范大学电子科学技术系, 2008.
- [4] EBERHART R C, SHI Y. Particle swarm optimization;

developments, applications and resources [C] // Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway NJ: IEEE Press, 2001: 81-86.

- [5] 周驰,高海兵,高亮,等. 粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究,2003(12): 7-11.
- [6] LOVBJERG M, RASMUSSEN T K, KRINK T. Hybrid particle swarm optimization with breeding and subpopulations [C]. San Francisco, USA: Proc of the Third Genetic and Evolutionary Computation Conference, 2001.
- [7] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle Swarm Optimization[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia: [s. n.], 1995: 1942-1948.
- [8] 曾建潮,介婧,崔志华. 微粒群算法[M]. 北京: 科学出版社,2004.
- [9] STEGER C, ULRICH M, WIEDEMANN C. Machine Vision Algorithms and Applications [M]. Wiley-VCH,2008.
- [10] 张铨伟,王彪,徐贵力. 摄像机标定方法研究[J]. 计算机技术与应用,2010(11):174-179.
- [11] 聂文淑. 基于 MEMS-IMU 的飞行器模型姿态测量系统的研究[D]. 厦门:厦门大学物理与机电工程学院,2011.

[编辑:李 辉]

(上接第 96 页)

4 结束语

本研究通过仿真计算分析发电机励磁系统调节参数对系统动态电压稳定的影响,可以得出以下有益的结论:

(1) 发电机及其控制系统作为电力系统的重要组成部分,对维持电力系统的稳定运行有着重要作用。发电机无功输出的减少不利于系统的动态电压稳定;

(2) 励磁系统是同步发电机的重要组成部分,励磁系统的快速励磁能力和强励性能对发电机的动态无功支撑能力有重要影响;

(3) 励磁系统调节参数是影响发电机的电压调节特性和强励性能的关键因素,励磁调节器的参数设置对维持电力系统的动态电压稳定性有重要作用。

本研究对预防电力系统电压失稳有一定的指导价值。针对电力系统的同一故障,发电机励磁系统间存在着协同的最优的励磁参数设置以最大程度地提高电力系统的动态电压稳定性,需要更进一步深入研究。

参考文献 (References):

- [1] TAYLOR W. Power System Voltage Stability[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

- [2] 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.
- [3] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2004,19(3):1387-1401.
- [5] 傅 旭,王锡凡,杜正春. 电力系统电压稳定及其展望[J]. 电力自动化设备,2005,25(2):1-9.
- [6] 高 鹏,石立宝,姚良忠,等. 辨识电网薄弱节点的多准则综合电压稳定指标[J]. 电网技术, 2009,33(19):26-31.
- [7] 段俊东,郭志忠,魏成江. 电压稳定临界域的描述及在线近似确定[J]. 继电器,2007,35(17):47-51.
- [8] 江 伟,王成山,余贻鑫. 电压稳定裕度对参数灵敏度求解的新方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(2):13-18.
- [9] 黄宇保,王建全. 基于 ANN 和等值发电机模型的快速暂态稳定计算[J]. 机电工程,2010,27(6):78-81.
- [10] 周晓渊,邱家驹,周 宏. 高压侧电压控制对电压稳定性的影响[J]. 高电压技术,2005,31(11):83-87.
- [11] 吴 浩. 电力系统电压稳定性研究[D]. 杭州:浙江大学电气学院, 2002.
- [12] 苏为民,方思立. 励磁系统典型数学模型及其参数选择[J]. 电力设备,2004,5(11):27-31.

[编辑:李 辉]