

自备电厂发电机励磁系统稳定性分析及控制研究

李兆伟¹, 周旭², 刘昱辰², 张林², 李威¹, 罗剑波¹, 赵长军³

(1. 南京南瑞集团公司/国网电力科学研究院, 江苏 南京 211102; 2. 南京南钢产业发展有限公司, 江苏 南京 210035;
3. 国网甘肃省电力公司平凉供电公司, 甘肃 平凉 744000)

摘要: 励磁系统的控制模式和控制参数对发电机及电力系统安全稳定运行有较大影响, 一些厂矿企业电网的停电事故, 暴露出自备电厂运行时存在励磁系统稳定问题。针对此问题, 建立了计及恒无功、恒功率因数励磁控制方式的Heffron-Philips扩展模型, 形成系统状态矩阵, 通过特征根分析研究影响励磁系统稳定性的主要因素; 基于根轨迹方法提出一种考虑系统稳定性的励磁系统控制参数优化方法。剖析了某实际厂矿企业自备电厂发电机组异常振荡现象的机理, 并改进了励磁控制参数, 仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 厂矿企业; 自备电厂; 励磁系统; 励磁控制方式; 根轨迹法

Analysis and control for captive generator excitation system stability

LI Zhao-wei¹, ZHOU Xu², LIU Yu-chen², ZHANG Lin², LI Wei¹, LUO Jian-bo¹, ZHAO Chang-jun³

(1. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211102, China; 2. Nanjing Nangang Industry Development Co., Ltd, Nanjing 210035, China; 3. Pingliang Electric Power Company, Pingliang 744000, China)

Abstract: The control mode and control parameters of excitation system exert larger influence on generator and power system safe and steady operation. Some power outage in the power grid of industrial enterprises revealed the excitation system stability problem in captive power plants. A Heffron-Philips extended model considering constant reactive power and constant power factor excitation control mode is established and system state matrix is formed. The main factors affecting excitation system stability are studied by eigenvalue analysis. A method for exciter parameters optimization is proposed based on system root locus. The abnormal oscillation phenomenon of captive generator in actual industrial enterprises power grid is analyzed and the exciter parameters is redesigned. The analysis and design approaches are verified by simulation results.

Key words: industrial enterprises; captive power plants; excitation system; supplementary excitation control; root locus method

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)10-0008-07

0 引言

大型厂矿企业通常建有自备供电系统, 部分地区自备电厂装机容量已经超过系统总装机的20%。相比常规电厂而言, 企业自备电厂的设备和管理水平相对落后, 安全运行问题突出。厂矿企业供电系统的安全稳定不仅影响企业自身的安全生产, 甚至会对接入的区域电网产生影响^[1]。实际系统中已发生过自备电厂无故障下发生机组振荡进而导致电厂全停的事故, 后经过对励磁控制方式调整后问题得以解决。然而, 全国范围内还有许多其他自备电厂或小容量机组存在着类似的安全稳定隐患, 这种由

励磁系统引起的稳定问题应引起充分重视。

目前厂矿企业自备电厂的励磁控制模式^[2]主要有四种: 恒机端电压控制(自动方式), 恒励磁电流控制(手动方式), 恒功率因数控制和恒无功控制。大型机组励磁系统一般采用恒机端电压控制方式, 可提高系统稳定运行能力。恒无功和恒功率因数控制通常作为恒电压控制的校正控制来保持发电机无功功率或功率因数不变^[3-4]。已有的研究表明接在系统中的主力大中型发电机不宜采用恒无功或恒功率因数控制, 否则对系统稳定性有负面影响^[5]; 而对小型发电机, 如自备电厂一些小型机组, 由于不会对电网电压产生重大影响, 出于对机组保护的考虑, 可能采用恒无功或恒功率因数励磁控制方式^[6-8], 本

文重点针对这两种励磁控制方式, 研究厂矿企业发电机励磁系统稳定问题, 并探讨对其进行改进的方案。

研究无故障下发生的振荡问题常采用小干扰分析法。目前应用于大电网仿真计算的机电暂态仿真软件在进行小干扰分析时一般对励磁系统进行简化处理, 忽略了恒无功、恒功率因数励磁控制方式对小干扰稳定的影响^[9], 因此无法满足详细考虑励磁的厂矿企业供电系统小干扰分析的要求。常用的工业电力系统仿真软件难以建立全系统的仿真模型, 也不支持系统级的小干扰分析。Heffron-Philips 模型^[10]是研究电力系统小干扰稳定的常用模型, 提供了与励磁系统的接口, 但没有考虑恒无功、恒功率因数等励磁控制方式的影响, 有待于对模型进行扩展。目前励磁参数整定及优化主要考虑控制系统性能要求, 一般不考虑电网系统整体的稳定特性^[11-14]。研究参数对系统稳定性影响多采用灵敏度分析方法^[15-16], 但其至少存在两个方面不足: 一是目前的灵敏度计算方法忽略了参数灵敏度的非线性, 不能准确描述参数任意初值任意步长变化下的控制效果; 二是参数灵敏度反映的是参数微小变化时特征根的移动方向和大小, 无法直接给出系统稳定时要求的参数取值范围。根轨迹法是一种求特征根的简单方法^[17], 可以直观分析典型参数变化对控制系统稳定特性的影响, 给出了参数优化调整的建议, 弥补参数灵敏度方法的不足。

本文将从建模出发, 建立适用于恒无功、恒功率因数励磁控制方式的 Heffron-Philips 扩展模型, 基于特征根分析研究厂矿企业供电系统励磁系统稳定问题的影响因素及励磁控制参数优化的改进方法, 最后结合实际发生的企业供电系统振荡事故进行仿真验证。

1 励磁系统稳定问题分析模型

为便于问题分析, 采用单机无穷大系统来研究企业自备电厂的励磁系统稳定问题。Heffron-Philips 模型描述的是发电机及其控制系统的线性化模型, 同步发电机采用计及凸极效应和励磁回路动态的三阶实用模型, 机械功率恒定, 同步发电机选择四个状态变量: 转速偏差 $\Delta\omega$ 、转子角偏差 $\Delta\delta$ 、q 轴暂态电动势偏差 $\Delta E'_q$ 、发电机励磁电压偏差 ΔE_{fd} , 基于小干扰动态稳定理论的同步机动态增量方程组如式(1)所示^[3]。

$$\begin{cases} \Delta M_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \\ \Delta U_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \\ T_j p \Delta \omega = \Delta M_m - \Delta M_e - D \Delta \omega \\ p \Delta \delta = 2\pi f_0 \Delta \omega \\ \Delta E'_q = \frac{K_3}{1 + K_3 p T'_{do}} \Delta E_{fd} - \frac{K_3 K_4}{1 + K_3 p T'_{do}} \Delta \delta \end{cases} \quad (1)$$

其中: p 为微分算子; $K_1 \sim K_6$ 为计算系数; 其他符号为电力系统惯用符号, 可参考文献[3]。

Heffron-Philips 模型提供了发电机和系统与励磁系统的接口, 但是没有考虑恒无功或恒功率因数等励磁控制方式的影响。为便于说明自备电厂发电机励磁系统稳定问题分析模型的建立过程, 本文选用一种无刷旋转交流励磁作为示例, 并选用恒无功励磁控制方式, 二者的控制框图如图 1 和图 2 所示。

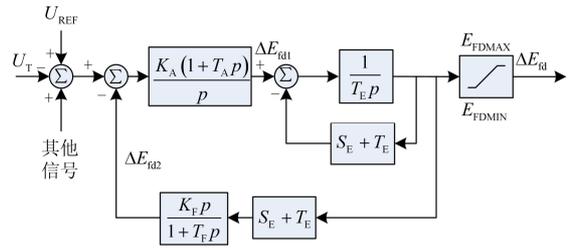


图 1 无刷旋转交流励磁控制框图

Fig. 1 Control diagram of brushless rotary AC excitation

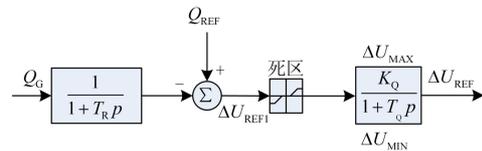


图 2 恒无功励磁附加控制框图

Fig. 2 Control diagram of reactive power excitation

图 1 即为一种无刷旋转交流励磁控制系统的框图, 其功能在于保持发电机端电压恒定, K_A , T_A , T_E , K_F , T_F 为相应的控制参数, S_E 为励磁机的饱和系数, p 为微分算子; 图 2 给出了恒无功控制的框图, 其输入为发电机的无功出力, 其输出为电压参考值的偏差, 可作为恒机端电压控制的输入, 形成恒电压控制的校正控制, 即图 1 和图 2 结合起来作为发电机的励磁控制系统, T_R 为测量时间常数, K_Q 为附加控制放大倍数, T_Q 为附加控制时间常数。通过推导整理可得考虑恒无功励磁控制的 Heffron-Philips 扩展模型如图 3 所示。

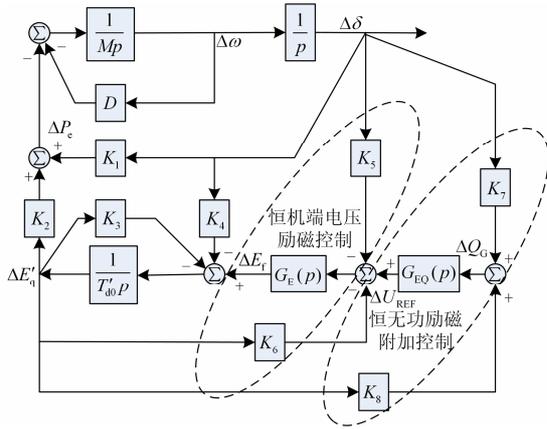


图 3 计及励磁控制方式的 Heffron-Philips 扩展模型
Fig. 3 Heffron-Philips model considering excitation control mode

其中 K_7 和 K_8 是把发电机无功增量 ΔQ_G 用状态量表示时的相关系数, 将在下文进行推导。 $G_E(p)$ 和 $G_{EQ}(p)$ 分别是恒电压控制和恒无功控制系统的传递函数, 可由图 1 和图 2 推导获得。为形成系统状态方程的标准形式, 需把励磁控制模型中每一个分母中具有算子 p 的环节后增加一个状态变量, 新增加的状态变量 ΔE_{fd1} 、 ΔE_{fd2} 、 ΔU_{REF} 、 ΔU_{REF1} 如图 1 和图 2 所示, 由传递函数框图可推得

$$\Delta \dot{E}_{fd1} = \frac{1}{T_E} \Delta E_{fd1} - \frac{S_E + T_E}{T_E} \Delta E_{fd1} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{E}_{fd1} = & -K_3 K_A T_A \Delta \omega + \left(\frac{K_4 K_6 K_A T_A}{T_{do}} - K_5 K_A \right) \Delta \delta + \left(\frac{K_6 K_A T_A}{K_3 T_{do}} - K_6 K_A \right) \Delta E'_q + \\ & \left(\frac{K_6 K_A T_A}{T_{do}} - \frac{K_A K_F T_A (S_E + T_E)^2}{T_E T_F} \right) \Delta E_{fd1} - \frac{K_A K_F T_A (S_E + T_E)}{T_E T_F} \Delta E_{fd1} + \end{aligned} \quad (3)$$

$$\left(\frac{K_A T_A}{T_F} - K_A \right) \Delta E_{fd2} + \left(K_A - \frac{K_A T_A}{T_Q} \right) \Delta U_{REF} + \frac{K_A K_Q T_A}{T_Q} \Delta U_{REF1} \quad (4)$$

$$\Delta \dot{E}_{fd2} = -\frac{K_F (S_E + T_E)^2}{T_E T_F} \Delta E_{fd1} + \frac{K_F (S_E + T_E)}{T_E T_F} \Delta E_{fd1} - \frac{1}{T_F} \Delta E_{fd2} \quad (4)$$

$$\Delta \dot{U}_{REF} = -\frac{1}{T_Q} \Delta U_{REF} + \frac{K_Q}{T_Q} \Delta U_{REF1} \quad (5)$$

$$\Delta \dot{U}_{REF1} = -\frac{1}{T_R} \Delta Q_G - \frac{1}{T_R} \Delta U_{REF1} \quad (6)$$

已知 $Q_G = E'_q i_d - i_d^2 x'_d - i_q^2 x_q$, 将 $Q_G = Q_{G0} + \Delta Q_G$, $E'_q = E'_{q0} + \Delta E'_q$, $i_d = i_{d0} + \Delta i_d$, $i_q = i_{q0} + \Delta i_q$, 代入其中, 略去高次项可得

$$\Delta Q_G = i_{d0} \Delta E'_q + (E'_{q0} - 2i_{d0} x'_d) \Delta i_d - 2i_{q0} x_q \Delta i_q \quad (7)$$

考虑定子电阻时, i_d 和 i_q 的表达式可由如下关系推导。

$$u_q = E'_q - i_d x'_d - r_1 i_q \quad (8)$$

$$u_d = i_q x_{q\Sigma} - r_1 i_d \quad (9)$$

可得 i_d 和 i_q 增量 Δi_d 和 Δi_q 的表达式为

$$\Delta i_q = \frac{r_1 \Delta E'_q}{A} + \frac{x'_{d\Sigma} U \cos \delta_0 + r_1 U \sin \delta_0}{A} \Delta \delta \quad (10)$$

$$\Delta i_d = \frac{x_{q\Sigma} \Delta E'_q}{A} + \left(\frac{x_{q\Sigma} x'_{d\Sigma} U \cos \delta_0}{r_1 A} + \frac{x_{q\Sigma} U \sin \delta_0}{A} - \frac{U \cos \delta_0}{r_1} \right) \Delta \delta \quad (11)$$

其中 $A = r_1^2 + x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}$, 将式(10)和式(11)代入式(7)可得

$$\Delta Q_G = K_7 \Delta \delta + K_8 \Delta E'_q \quad (12)$$

$$K_7 = \frac{U}{A} [(E'_{q0} - 2i_{d0} x'_d) (x_{q\Sigma} \sin \delta_0 - r_1 \cos \delta_0) - 2i_{q0} x_q (x'_{d\Sigma} \cos \delta_0 + r_1 \cos \delta_0)] \quad (13)$$

$$K_8 = i_{d0} + \frac{(E'_{q0} - 2i_{d0} x'_d) x_{q\Sigma} - 2i_{q0} r_1 x_q}{A} \quad (14)$$

由此可形成线性化系统的标准状态方程为

$$\dot{X} = AX \quad (15)$$

$$X = [\Delta \omega, \Delta \delta, \Delta E'_q, \Delta E_{fd1}, \Delta E_{fd2}, \Delta U_{REF}, \Delta U_{REF1}]^T \quad (16)$$

状态矩阵 A 可用表 1 来表示, 通过分析该状态矩阵特征根的分布情况来判断系统小干扰稳定特性。恒功率因数控制方式分析模型的建立与此类似, 限于篇幅, 不再赘述。

2 励磁系统稳定问题影响因素分析及参数优化改进

利用根轨迹法可以分析励磁系统所有参数对系统的影响, 本文重点针对恒无功、恒功率因数励磁控制方式开展研究, 讨论 K_Q , T_R 和 T_Q 三个参数的影响。此外, 系统初始运行工况会影响系统状态矩阵, 考虑到厂矿企业一般存在冲击性负荷, 系统运行方式可能存在较大变化, 因此系统运行方式对励磁系统稳定性的影响也进行了分析。

以如图 4 所示的单机无穷大系统为基础进行分析, 其中负荷 100 MW, 发电机有功出力 45 MW, $x_d = x_q = 2.22$, $x'_d = x'_q = 0.26$, $x_L = 0.11$, $M = 6$ s, $T'_d = 6.48$ s, $K_A = 20$, $T_A = 0.1$ s, $T_E = 0.5$ s, $S_{EMAX} = 0.8$, $S_{E0.75MAX} = 0.5$, $K_F = 0.04$, $T_F = 0.7$ s, $T_R = 0.02$, $K_Q = 20$, $T_Q = 0.3$ s。

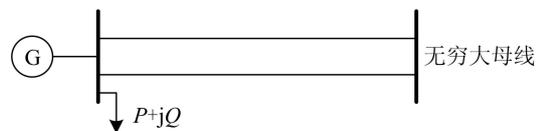


图 4 单机无穷大系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of SMIB system

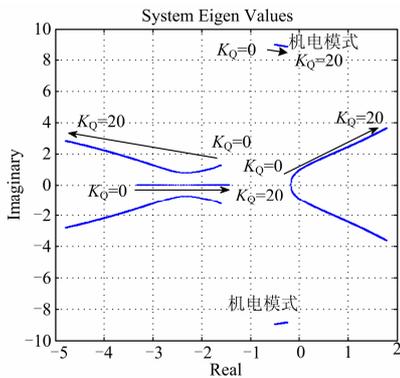
表 1 考虑恒无功励磁控制的系统状态矩阵 A

Table 1 System state matrix with supplementary excitation control

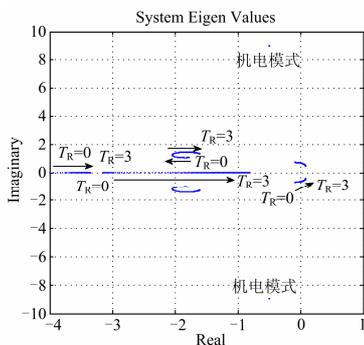
$\Delta \dot{x}$	$\Delta \omega$	$\Delta \delta$	$\Delta E'_q$	$\Delta E'_{fd}$	ΔE_{fd1}	ΔE_{fd2}	ΔU_{REF}	ΔU_{REF1}
$\Delta \dot{\omega}$	$-\frac{D}{T_j}$	$-\frac{K_1}{T_j}$	$-\frac{K_2}{T_j}$					
$\Delta \dot{\delta}$	$2\pi f_0$							
$\Delta \dot{E}'_q$		$-\frac{K_4}{T'_{do}}$	$-\frac{1}{K_2 T'_{do}}$	$\frac{1}{T'_{do}}$				
$\Delta \dot{E}'_{fd}$				$-\frac{S_E + T_E}{T_E}$	$\frac{1}{T_E}$			
$\Delta \dot{E}_{fd1}$	$-K_5 K_A T_A$	$\frac{K_2 K_A K_A T_A}{T'_{do}} - K_2 K_A$	$\frac{K_2 K_A T_A}{K_3 T'_{do}} - K_2 K_A$	$\frac{K_6 K_A T_A}{T'_{do}} - \frac{K_A K_F T_A (S_E + T_E)^2}{T_E T_F}$	$-\frac{K_A K_F T_A (S_E + T_E)}{T_E T_F}$	$\frac{K_A T_A}{T_F} - K_A$	$K_A - \frac{K_A T_A}{T_0}$	$\frac{K_A K_Q T_A}{T_0}$
$\Delta \dot{E}_{fd2}$				$-\frac{K_F (S_E + T_E)^2}{T_E T_F}$	$\frac{K_F (S_E + T_E)}{T_E T_F}$	$-\frac{1}{T_F}$		
$\Delta \dot{U}_{REF}$							$-\frac{1}{T_Q}$	$\frac{K_Q}{T_0}$
$\Delta \dot{U}_{REF1}$		$-\frac{K_7}{T_R}$	$-\frac{K_7}{T_R}$					$-\frac{1}{T_R}$

2.1 励磁控制参数对励磁系统稳定的影响

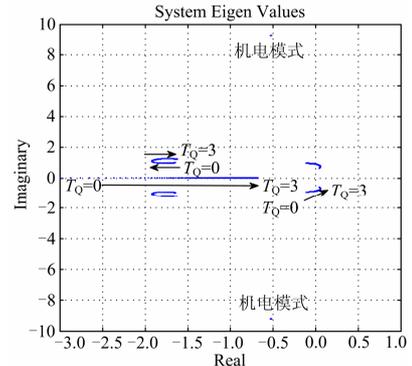
以恒无功控制为例, 结合前文的分析, 形成系统的状态矩阵。分别作出系统随 K_Q , T_R 和 T_Q 变化的根轨迹。系统根轨迹曲线如图 5 所示。



(a) K_Q 变化时的系统根轨迹曲线



(b) T_R 变化时的系统根轨迹曲线



(c) T_Q 变化时的系统根轨迹曲线

图 5 不同参数变化下系统根轨迹

Fig. 5 System root locus with different parameters

由根轨迹曲线可以看出, 随着 K_Q 、 T_R 和 T_Q 等参数的增大, 会导致最右侧特征根实部增大, 参数过大时, 系统均可能出现正实部的特征根。可见系统稳定特性受参数影响较大, 参数整定时不应只考虑控制系统的性能要求, 还需综合考虑参数对系统整体稳定特性的影响。此外, 在给定的参数变化范围内该系统的机电暂态模式对应的特征根实部始终为负数, 这也与采用机电暂态仿真软件分析时系统稳定相符。

根据上述分析适当调整恒无功励磁控制参数, 设置 $K_Q=1$, $T_R=0.02$, $T_Q=0.3$, 形成系统状态矩阵, 并进行特征根分析, 其结果如表 2 所示。

表 2 特征根分析结果

Table 2 Eigenvalue analysis with original parameters

特征根	阻尼比/%	振荡频率/Hz
-49.999 7	—	—
-0.4944±8.9811i	5.5	1.429 4
-3.142 2	—	—
-1.7818±1.0450i	86.3	0.166 3
-0.0803±0.7073i	11.3	0.112 6

由表 2 可见，系统无正实部特征根，系统小扰动下可保持稳定。将此恒无功励磁控制模型加入仿真系统，系统在负荷冲击和三相短路故障下也可保持稳定，详细可见第 3 节仿真分析结果。

2.2 运行方式的影响

为研究运行方式变化对系统稳定性的影响，增加图 4 系统负荷至 300 MW，其他运行条件不变，特征根分析结果如表 3 所示。

表 3 特征根分析结果

Table 3 Eigenvalue analysis with modified parameters

特征根	阻尼比/%	振荡频率/Hz
-49.965 5	—	—
-0.1478±8.3711i	1.8	1.332 3
1.7797±3.8444i	-42.0	0.611 9
-5.1064±2.9103i	86.9	0.463 2
-1.438 8	—	—

可见，受运行方式影响，系统出现了正实部的特征根，系统小扰动下不稳定。因此基于根轨迹方法对励磁系统参数进行优化时，应充分考虑可能存在的最恶劣运行方式，以提高整定参数的适应性。在该方式下适当减小 K_Q 的值可使系统所有特征根实部为负。

因此，在整定实际励磁系统参数时，首先由励磁厂家提供能满足励磁控制性能要求的各参数的取值范围，然后考虑恶劣运行方式，建立系统的状态矩阵，利用根轨迹法分析系统无正实部特征根时各参数的合理范围，取两者的交集作为励磁参数优化整定的依据，这样整定的参数既可以满足系统控制性能，又可满足系统小干扰稳定性。

3 实际系统仿真分析

基于某实际厂矿企业供电系统搭建仿真模型，网架示意图如图 6 所示。该企业电网曾在 2011 年 6 月 26 日无故障下发生自备机组振荡解列事故，经初步分析为励磁控制方式选择不当：事故前采用恒无功励磁控制，事故后进行整改，将励磁控制方式调

整为恒电压控制后，系统未再发生类似事故。为复现该现象，并检验本文所提出的分析方法，仿真中励磁控制分别采用恒电压控制、初始参数下的恒无功控制、改进参数后的恒无功控制，通过施加冲击负荷和 E-Y 单回线三相短路故障分别进行时域仿真，仿真结果见图 7 所示。

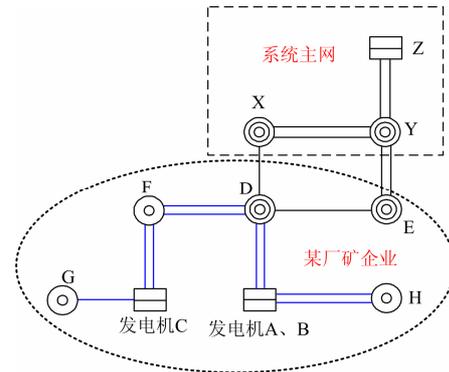


图 6 某实际系统网架示意图

Fig. 6 Schematic diagram of some real system

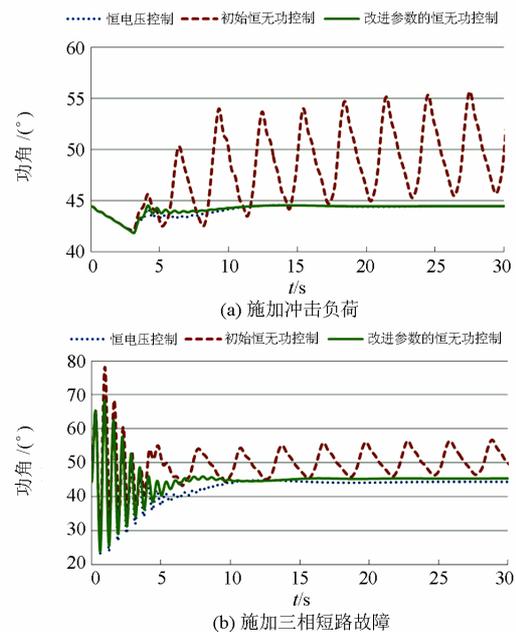


图 7 不同励磁方式下发电机 A 功角响应曲线

Fig. 7 Response curves of power angle of generator A with different excitation control

由图 7 可见，当励磁控制采用初始参数的恒无功控制时，通过仿真复现了振荡现象。将振荡频率与小扰动分析结果比较，证实了仿真复现的振荡并非机电振荡模式，而是由于励磁系统自身失稳造成的。采用恒电压控制方式时，系统在负荷冲击或三相短路故障下均可保持稳定，与实际中更改励磁控制模式后未再发生振荡事故相符。采用改进控制参

数后的恒无功励磁控制, 同样的扰动条件下系统可保持稳定, 验证了所提出方法的有效性。

4 结论

厂矿企业供电系统中, 励磁系统稳定性是值得关注的问题。本文针对实际厂矿企业中曾发生的因励磁控制方式不当导致励磁系统失稳而引发的机组振荡解列事故, 提出了励磁控制系统稳定性分析模型, 基于根轨迹法研究了励磁系统稳定性的影响因素及参数优化改进方法, 有以下成果和结论:

1) 建立了适用于恒无功、恒功率因数励磁控制方式的 Heffron-Philips 扩展模型, 基于根轨迹研究了影响其稳定性的主要因素, 表明励磁控制系统参数的准确性对系统稳定性有较大影响, 励磁参数的整定应综合考虑控制性能和系统稳定特性。

2) 由于厂矿企业普遍存在冲击性负荷, 励磁系统参数整定时应充分考虑可能存在的最恶劣运行方式, 以提高整定参数的适应性。

3) 通过搭建仿真系统复现了实际厂矿企业发生的由于励磁系统稳定问题导致的振荡事故, 基于根轨迹法对控制系统参数进行优化, 仿真结果验证了设计方法的有效性。

参考文献

- [1] 张林, 罗剑波, 崔晓丹, 等. 大型厂矿企业供电系统安全运行关键技术及实施方案探讨[J]. 工矿自动化, 2013, 39(10): 99-103.
ZHANG Lin, LUO Jian-bo, CUI Xiao-dan, et al. Probe on key technologies of safety operation and implementation scheme for power supply system of industrial and mining enterprises[J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(10): 99-103.
- [2] IEEE Std 421.5-2004 recommended practice for excitation system models for power system stability studies excitation[S].
- [3] MUMMERT C R. Models for var and power factor controllers added to IEEE 421.5[S].
- [4] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [5] HURLEY J D, BIZE L N, MUMMERT C R. The adverse effects of excitation system var and power factor controllers [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 24(4): 1639-1645.
- [6] 贾贵玺, 陈起, 董钺, 等. 小功率发电机励磁系统的恒功率控制[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(6): 567-570.
JIA Gui-xi, CHEN Qi, DONG Yue, et al. Constant power factor control for excitation system of the small synchronous generator[J]. Electric Machine and Control, 2006, 10(6): 567-570.
- [7] 黎雄, 马旭, 孙元章. 发电机非线性恒功率因数励磁控制研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(4): 5-8.
LI Xiong, MA Xu, SUN Yuan-zhang. Nonlinear constant power factor excitation control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(4): 5-8.
- [8] 黎雄, 马旭, 孙元章. 发电机非线性恒无功励磁控制研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 1-4.
LI Xiong, MA Xu, SUN Yuan-zhang. Nonlinear constant reactive power excitation control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 1-4.
- [9] 王阳, 鲁宗相, 闵勇, 等. 基于降阶模型的多源微网小干扰分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 1-8.
WANG Yang, LU Zong-xiang, MIN Yong, et al. Small-signal analysis of micro-grid with multiple micro sources based on reduced order model in islanding operation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 1-8.
- [10] 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.
- [11] 罗建, 任成君, 冯树辉. 基于线性最优控制和积分控制的励磁控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 134-140.
LUO Jian, REN Cheng-jun, FENG Shu-hui. Design of excitation controller based on linear optimal and integral control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 134-140.
- [12] 王杨正, 蒋平. 基于约束非线性规划的励磁系统参数优化[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 65-68.
WANG Yang-zheng, JIANG Ping. Parameter optimization of excitation system based on constrained nonlinear programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 65-68.
- [13] 杨伟, 李仁东. 带电压反馈的非线性最优励磁控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 110-114.
YANG Wei, LI Ren-dong. Design of nonlinear optimal excitation controller with voltage feedback[J]. Power

- System Protection and Control, 2010, 38(14): 110-114.
- [14] 赵平, 姚伟, 王少荣. 采用协同控制理论的同步发电机非线性励磁控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 1-7.
- ZHAO Ping, YAO Wei, WANG Shao-rong. Nonlinear excitation control for synchronous generator using synergetic control theory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 1-7.
- [15] 夏晨阳, 孙跃, 贾娜, 等. 耦合磁共振电能传输系统磁路机构参数优化[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 139-145.
- XIA Chen-yang, SUN Yue, JIA Na, et al. Magnetic circuit parameter optimization for coupled magnetic resonance power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 139-145.
- [16] 汪旒, 刘辉, 陈武晖, 等. 水轮发电机组励磁与水门协调控制设计[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 262-268.
- WANG Ni, LIU Hui, CHEN Wu-hui, et al. Coordinated control for the excitation and governing of hydro turbine generator set[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 262-268.
- [17] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
-
- 收稿日期: 2014-02-18; 修回日期: 2014-04-08
- 作者简介:
- 李兆伟 (1985-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: victorlee_nari@126.com
- 周旭 (1967-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为工业自动化、供电系统安全调控;
- 刘昱辰 (1983-), 男, 大专, 助理工程师, 研究方向为供电系统安全运行控制。