

采用大功率电力电子全控器件的新型励磁系统

何丽娜, 毛承雄, 陆继明, 王 丹

(华中科技大学湖北省电力安全与高效利用重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 为了提高电力系统的稳定性, 提出了一种基于全控器件的新型励磁系统, 该励磁系统能通过励磁控制, 以及与机端系统交换无功功率, 为系统提供双重阻尼。新型励磁系统采用最优协调控制策略, 在 PSASP 环境下进行的单机无穷大系统的数字仿真结果表明, 新型励磁系统能够适应运行方式的大范围变化, 在大小扰动下较常规自并励励磁系统表现出更好的动态性能。

关键词: 全控器件; 新型励磁系统; 电压源换流器; 电力系统; 最优协调控制策略; 低频振荡

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 1003-6520(2009)07-1711-07

Novel Excitation System Using High Power Electronics Full Controlled Devices Rectifier

HE Li-na, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, WANG Dan

(Hubei Electric Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Lab, Department of Electrical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to improve the stability of power system, we put forward a novel excitation system based on full controlled devices rectifier, which can provide double kinds of damping for power system by excitation control and exchanging reactive with generator. The novel excitation system uses the optimal coordinated control strategy. The simulation results of the single machine infinite bus system based on PSASP show that the novel excitation system can provide good control performance under various operating points and different disturbances.

Key words: full controlled devices; novel excitation system; voltage source converter; power system; optimal coordinated control strategy; low-frequency oscillations

0 引言

随着电力系统规模的扩大、远距离重负荷输电线路的出现、以及大型发电机普遍使用快速励磁系统, 在实现电力资源优化配置、提高系统发、输电经济性和可靠性的同时, 也带来了一系列新的问题, 其突出表现为由于互联系统阻尼不足而导致的大范围区域间的功率振荡^[1-3]。

发电机励磁控制对于提高稳定性有着重要的影响, 在众多提高稳定性的措施中(例如快关汽门、电阻制动、串并联补偿等), 励磁控制是效益与投资比最高的, 是首选措施^[4,5]。

目前, 改善发电机励磁系统性能主要侧重于新控制理论的应用研究^[6-9], 例如 H 滑模鲁棒励磁控制器、神经网络最优励磁控制器(NNOEC)等。本文将现代大功率电力电子技术应用于同步发电机励磁控制系统, 提出基于大功率电力电子全控器件的同步发电机的新型励磁系统, 该系统采用全控器件换流器替代常规自并励励磁系统中的晶闸管换流器。由于全控器件换流器具有整流、逆变以及交流

侧无功功率正负灵活可调的特点^[10], 新型励磁系统可以独立控制直流侧励磁电压和交流侧无功功率, 这相当于在常规励磁系统之外, 又增加了一个 STATCOM^[11,12]。最优控制理论为交直流两侧的协调控制奠定了理论基础, 因此, 新型励磁系统将能够在完成发电机励磁控制的同时, 为电力系统提供更多阻尼。此外, 常规励磁是利用励磁电流控制改变内电势 E_q 的, 由于励磁绕组的时间常数是秒级的, 故常规励磁抑制低频振荡的效果滞后, 不利于系统稳定, 而文章提出的新型励磁系统可以对机端电压进行直接控制, 迅速补偿, 有利于增大减速面积, 减小加速面积, 提高电力系统稳定性。与晶闸管构成换流器的常规励磁系统相比, 基于全控器件的新型励磁系统的主要优点可归结为:

1) 直流侧在提供同步发电机直流励磁电流的同时, 其交流侧可以根据需要向同步发电机端发出或吸收无功, 而晶闸管构成的整流桥无论在整流状态或逆变状态都从机端吸收无功且无法独立控制;

2) 全控器件开关频率比晶闸管要高很多, 所以其产生的谐波要小很多;

3) 基于全控器件构成的整流桥在逆变时没有换相失败问题。

基金资助项目: 教育部科学技术研究重点项目(107128)。

Project Supported by Key Program of Chinese Ministry of Education(107128).

1 新型励磁系统的原理及等效模型

1.1 新型励磁系统的原理

新型励磁系统是在常规自并励励磁系统的基础上,采用全控器件换流器替代常规自并励励磁系统中的晶闸管换流器,由于全控器件换流器的交流侧无功功率正负灵活可调的特点,新型励磁系统能通过励磁控制,以及与机端系统交换无功功率为系统提供双重阻尼,维持机端电压恒定,提高电力系统的稳定性,新型励磁系统的原理框图见图1,其中 P 、 Q 分别表示励磁系统从发电机机端吸收的有功功率和无功功率; I_{fd} 为励磁电流。而晶闸管换流器构成的常规自并励励磁系统只能通过控制励磁电压实现发电机的励磁控制。因此,新型励磁系统有望大幅提高发电机励磁系统的性能,改善电力系统的稳定性。

发电机和电力系统要求励磁系统能够使励磁电流发电机零起升压和逆变。其中,零起升压便于同步发电机试验和起励控制,逆变能使励磁电流快速下降,加快励磁系统调节速度,还可当发电机或机端升压变压器内部故障时实现快速灭磁。

鉴于同步发电机的励磁绕组是一个大电感,基于全控器件的新型励磁系统的运行工况可简化为一个由全控器件构成的整流桥带大电感负载工作,目前能够实现该功能的典型电路有:电压源型整流(voltage source converter, VSC)加桥式斩波电路(chopper)和电流源型整流电路(current source converter, CSC),其电路的基本拓扑结构见图2^[13-15]。由于励磁绕组固有的电流源特性,电流源型换流器的直流侧可以与励磁绕组直接相连;而电压源型换流器由于其固有的电压源特性无法直接带励磁绕组,而且其直流侧的电压高于输入交流侧电压峰值,不能实现逆变灭磁,无法满足发电机和电力系统对励磁的基本要求,故电压源型换流器用于励磁系统的功率单元时在其直流侧必须通过斩波电路与励磁绕组相连。

1.2 新型励磁系统的等效模型

新型励磁系统采用的是基于全控器件的 PWM 换流器,该换流器包括 VSC 和 CSC。相比较而言, VSC 谐波较小、控制方法较为成熟、而且其直流侧电压平稳,有利于斩波器控制励磁电压。因此,本文将重点研究电压源型换流器。

PWM 换流器通过 d 、 q 解耦控制实现有功和无功功率的独立控制^[16,17],其中电压源型换流器有功控制是维持 VSC 直流侧电压恒定,无功控制是控制 VSC 交流侧的无功电流^[13]。从文[18]可知,VSC 交流侧电压大范围变化时,通过解耦控制 VSC 直流

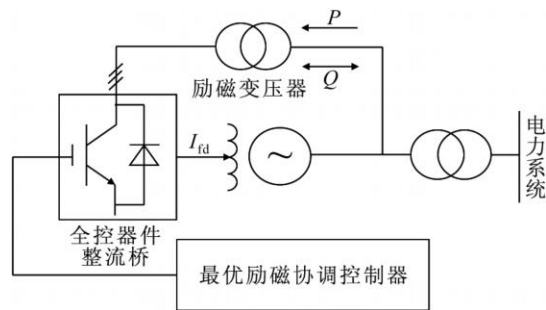


图1 基于新型励磁的同步发电机系统
Fig.1 Synchronous generator system based on novel excitation system

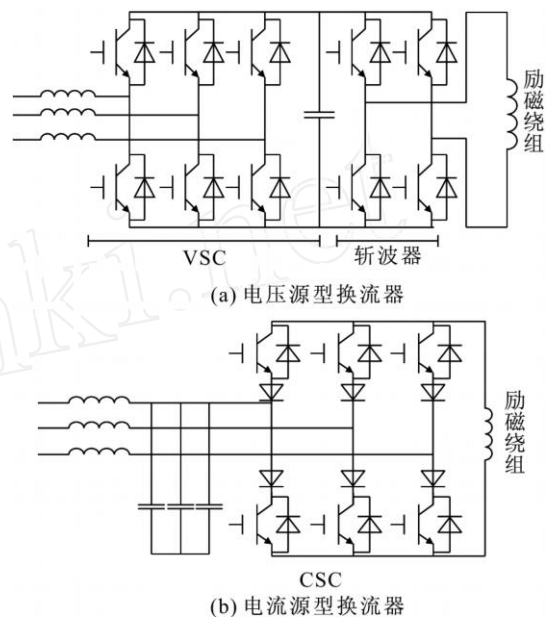


图2 电压源型换流器和电流源型换流器
Fig.2 Voltage source converter and current source inverter

侧电压都能维持恒定。因此,本文提出的新型励磁系统在机端电压大范围变化时,励磁系统中 VSC 的直流侧电压能维持恒定,通过调整 VSC 直流侧斩波电路的占空比来实现励磁电压的控制。这种情况下,新型励磁系统的励磁电压可理解为由恒压源通过斩波电路提供,即励磁电压的大小只与斩波电路的占空比有关^[5]。而常规自并励励磁系统的励磁电压不仅与晶闸管换流器的控制角有关,还与发电机机端电压有关。由于机端电压可变,仅仅通过调整晶闸管换流器的控制角实现励磁电压的控制,理论上其控制效果将不及新型励磁系统。

另一方面,基于 VSC 交流侧无功电流可控,新型励磁系统的交流侧与机端系统能快速交换无功,提高系统阻尼、抑制振荡,这相当于在常规励磁系统之外,又增加了一个 STATCOM^[19]。新型励磁系

统的等效模型见图 3 虚线框。

2 基于新型励磁系统的单机无穷大系统

基于全控器件的新型励磁系统的单机无穷大系统见图 3。其中, U_t 为机端母线电压; x_t 、 x_L 分别为变压器和输电线路的电抗; U_s 为无穷大母线电压; i_d 和 i_q 为发电机定子电流的 d 、 q 分量; $i_{L,d}$ 和 $i_{L,q}$ 为流过变压器电流的 d 、 q 分量; i_{sd} 和 i_{sq} 为 STATCOM 注入机端电流的 d 、 q 分量。

新型励磁系统实现励磁控制的实质是励磁电压 E_{fd} 的控制和新型励磁系统与机端系统交换无功 Q 的注入, 基于新型励磁系统注入无功部分可等效为 STATCOM, 故与系统交换无功功率的动态特性可仿效 STATCOM 等效为一阶模型, 其具体表达式如下

$$\dot{Q} = -\frac{1}{T_Q} Q + \frac{1}{T_Q} Q^* \quad (1)$$

式中, Q 为新型励磁系统的换流器向系统注入的无功功率; Q^* 为换流器的控制量; T_Q 为换流器的惯性时间常数, 基于换流器采用全控器件, 响应时间一般为 $10 \sim 40 \text{ ms}$ ^[20, 21]。

在建立线性化模型时, 对发电机进行如下简化:

忽略阻尼效应; 忽略定子绕组电阻; 不考虑定子绕组和负荷的动态过程; 不考虑饱和效应。同步发电机可用 3 阶微分方程描述, 如文[5]所示。将发电机的 3 阶方程与式(1)进行偏差化、线性化, 则基于新型励磁系统的单机无穷大系统的数学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_e \\ \dot{\omega} \\ \dot{U}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_{11} & K_{17} & \frac{1-K_2 K_{11}}{K_{10}} & K_{21} \\ K_{10} & K_{13} & K_{14} & K_{11} K_{13} + K_{15} \\ K_{10} & K_{17} & K_2 & K_{11} K_{17} + K_7 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_e \\ \omega \\ U_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{K_{11}}{K_{10} T_{d0}} & K_{20} \\ 0 & K_{23} \\ \frac{1}{T_{d0}} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{fd} \\ Q \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $K_1 \sim K_{23}$ 是与发电机的运行状态和系统参数有关的系数, 具体表达式见附录 1; P_e 、 ω 和 U_t 分别为电磁功率、角速度和机端电压的偏差; T_{d0} 为励磁电流的衰减时间常数; 其中控制变量有: E_{fd} 和

Q , E_{fd} 为新型励磁电压, Q 为新型励磁系统与机端交换的无功功率。新型励磁系统通过 E_{fd} 和 Q 的控制双通道为系统提供阻尼; 而常规励磁系统模型中的控制变量只有 E_{fd} , 即只能通过控制 E_{fd} 为系统提供阻尼比。因此, 利用新型励磁系统阻尼功率振荡的效果将更为突出, 其控制途径也将更为灵活。

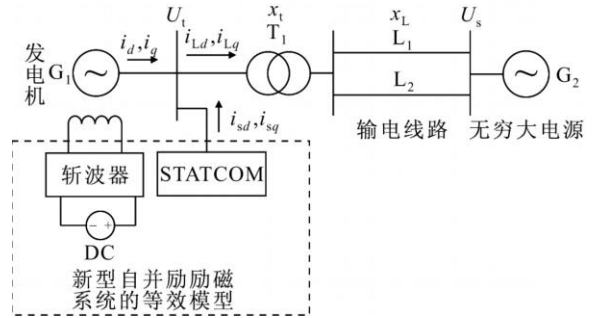


图 3 基于新型励磁系统的单机无穷大系统

Fig. 3 Single machine infinite bus system based on novel bus fed static excitation system

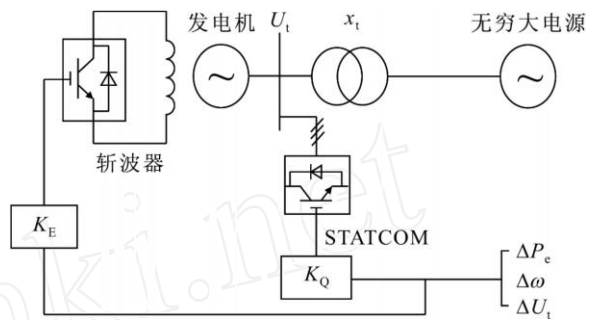


图 4 新型励磁系统控制器结构框图

Fig. 4 Block diagram of novel excitation system controller

3 新型励磁系统的协调控制策略及控制器的设计

协调控制策略是在满足大型同步发电机运行要求的前提下通过合适的控制策略实现励磁系统的交流侧无功和直流励磁电流相互协调, 共同为同步发电机和电力系统提供正阻尼, 以保证同步发电机和电力系统具有良好的稳态和动态性能。线性最优控制理论作为现代控制理论的一个重要组成部分, 将最优理论用于控制问题, 其本身含有控制变量之间的协调作用, 可以解决多输入多输出变量间的最优协调控制问题。因此, 新型励磁系统的协调控制策略将采用线性最优控制理论实现^[22, 23]。

式(2)对应于 $\dot{X} = AX + BU$ 的状态方程标准形式, 在设计中采用如下二次型性能指标

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (X^T QX + U^T RU) dt = J_{\min} \quad (3)$$

式中, 状态量 $X = [P_e \quad \omega \quad U_t]^T$; 控制量 $U = [E_{fd} \quad Q]^T$; Q 是对应于状态量的权矩阵; R 是对应于控制量的权矩阵; 其中 Q 、 R 均为对角阵, 当 R 固定时, Q 阵中对角元素的值越大, 其对应的状态量的反馈增益 k 也越大, 也就使得控制系统对该状态量的变化更为敏感, 系统动态品质更好。根据最

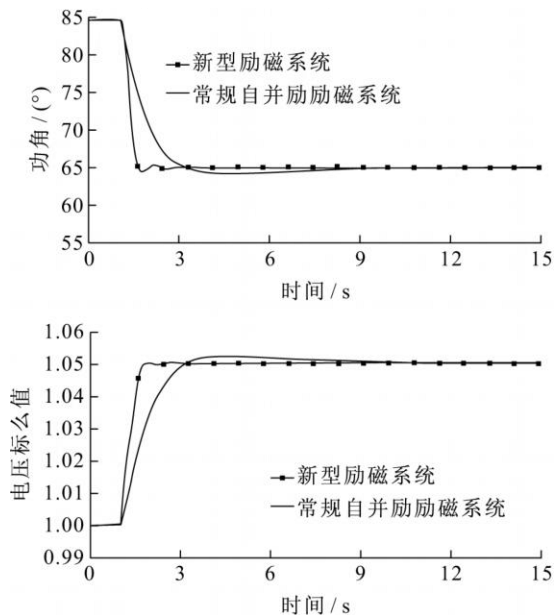


图 5 发电机参考电压上升 5% 的系统响应

Fig. 5 Response of generator for a 5% increase in the reference voltage

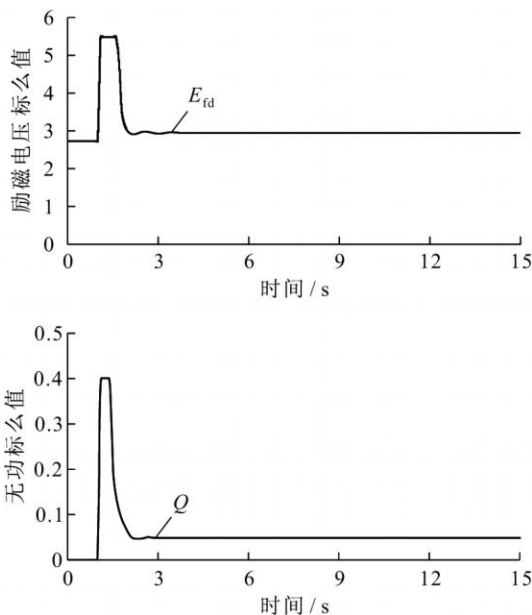


图 6 发电机参考电压上升 5% 的励磁控制图

Fig. 6 Excitation control charts of generator for a 5% increase in the reference voltage

优控制理论,满足使指标泛函 J 为极小值的控制向量—最优控制向量为: $U^* = -R^{-1}B^T P X$, 其中 $K^* = R^{-1}B^T P$ 为最优反馈增益向量, P 是黎卡梯方程: $PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$ 的解。

新型励磁系统控制器的总体结构见图 4, 其中 K_E 、 K_Q 分别为励磁电压和无功功率的反馈增益矩阵。

4 PSASP 环境下的仿真研究

为了研究新型励磁系统在抑制系统低频/超低频振荡、增强阻尼等方面的有效性,本节针对单机无穷大系统,基于 PSASP 环境分别采用功率注入法和电流注入法建立新型励磁系统的潮流模型和暂态模型,并对比常规自并励励磁系统进行了几种扰动分析研究^[24]。

仿真中系统基准容量为 100 MVA,设置新型励磁系统强励顶值为额定励磁电压的两倍,新型励磁系统与机端系统交换的无功容量为发电机额定无功容量的 1/10。仿真采用的发电机采用 PSASP 中 3 型同步机和 1 型调速器,励磁系统分别采用新型励磁系统和常规自并励励磁系统,其中常规自并励励磁系统采用 PSASP 中 12 型 AVR,并带 PSS。

4.1 发电机机端参考值电压上升 5%

扰动设置为: $t = 1$ s 时发电机机端参考值电压上升 5%,发电机分别采用新型励磁系统和常规自并励励磁系统,系统仿真曲线见图 5。其中新型励磁系统的控制量励磁电压 E_{fd} 和励磁系统与发电机

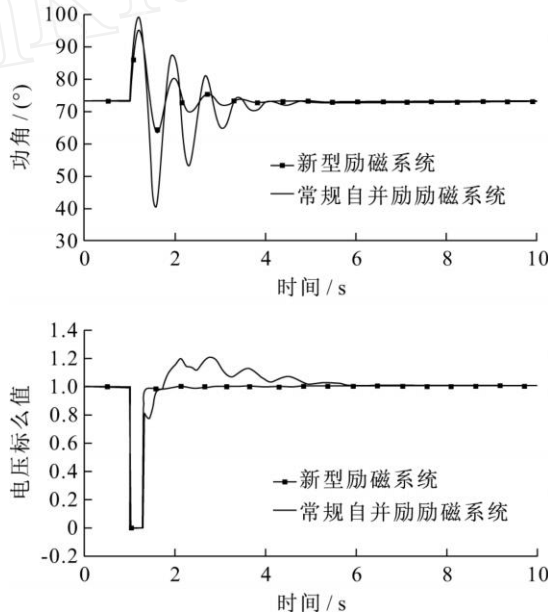


图 7 发电机出口三相短路的系统响应

Fig. 7 Response for three-phase fault at the terminals of generator

机端交换的无功 Q 的仿真曲线见图 6。由图 5 可见,新型励磁系统能提供更多的阻尼,具有良好的动态相应特性,其控制效果优于常规自并励励磁系统。

4.2 发电机母线三相对地短路

扰动设置为: $t = 1$ s 时机端三相对地短路,0.3 s 后重合闸,发电机分别采用新型励磁系统和常规自并励励磁系统,系统仿真曲线见图 7。其中新型励磁系统的控制量励磁电压 E_{fd} 和励磁系统与发电机

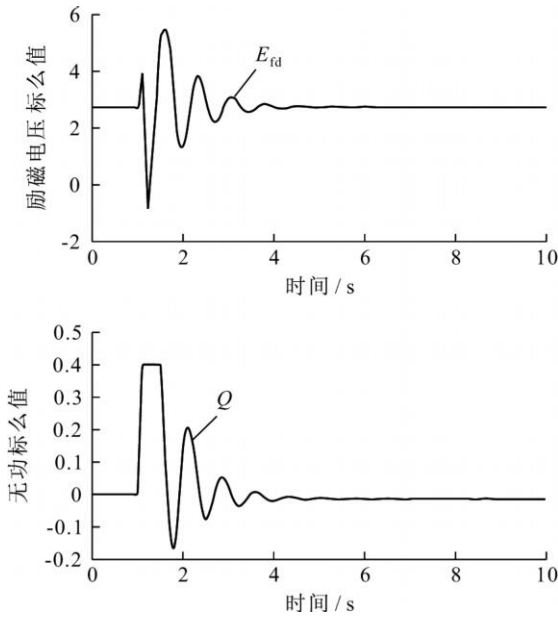


图8 发电机出口三相短路的励磁控制图
Fig. 8 Excitation control charts of three-phase fault at the terminals of generator

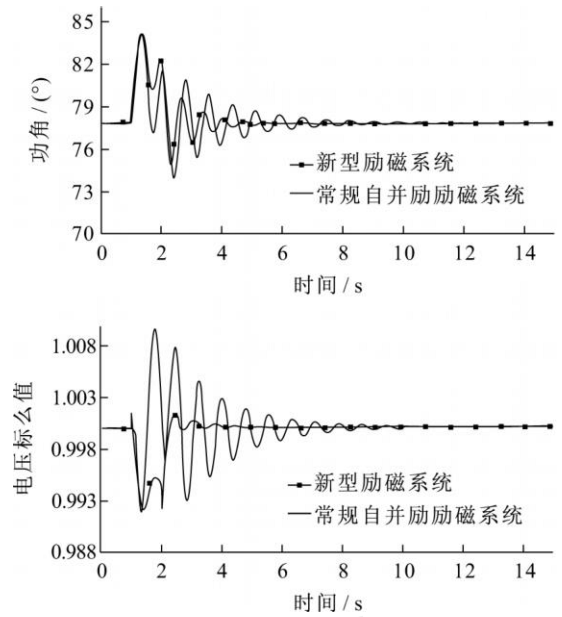


图9 单双回线路切换运行的系统响应
Fig. 9 Response for switchover operation of single and double circuit transmission lines

机端交换的无功 Q 的仿真曲线见图8。从两图中可以看出,本文所提出的新型励磁系统不仅表现出很好的阻尼特性,还改善了发电机的端电压性能,有效提高了系统的稳定性。

4.3 单双回线路切换运行

扰动设置为: $t=1\text{ s}$ 双回线路一回断线; 2 s 后恢复双回线运行,发电机分别采用新型励磁系统和常规自并励励磁系统时,系统仿真曲线见图9。其中新型励磁系统的控制量励磁电压 E_{fd} 和励磁系统与发电机机端交换的无功 Q 的仿真曲线见图10。从两图中可以看出,本文所提出的新型励磁系统的阻尼特性和发电机的端电压性能都有了明显改善,说明新型励磁系统能有效提高了系统的稳定性。

5 结论

a) 本文将全控电力电子器件应用于励磁系统,提出了一种基于全控器件的新型励磁系统,相比较常规自并励励磁系统的单一的励磁电压控制,新型励磁系统能同时控制励磁电压和注入机端系统的无功,为系统提供双重阻尼。仿真结果表明,新型励磁系统能够适应系统运行参量的大范围变化,在大扰动和小扰动下均表现出良好的动态特性。

b) 本文提出的新型励磁系统在多机系统中也表现出良好的动态性能,通过对华中电网各种运行方式的仿真计算,表明新型励磁系统能有效提高电力系统及联络线的阻尼和抑制其低频/超低频振荡。

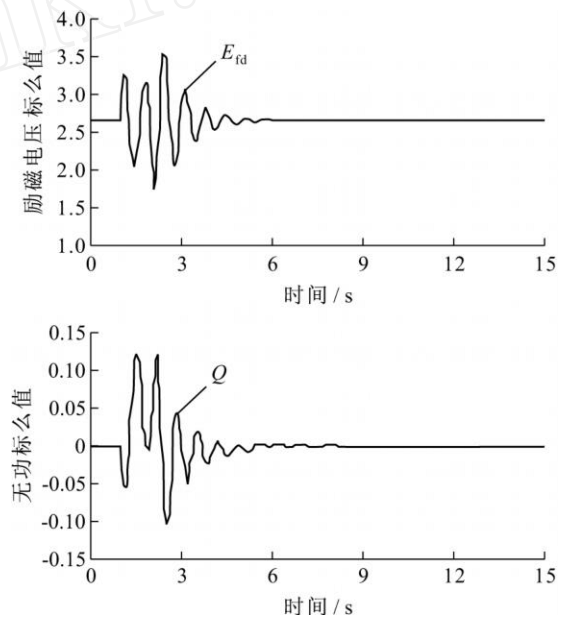


图10 单双回线路切换运行的励磁控制图
Fig. 10 Excitation control charts of switchover operation of single and double circuit transmission lines

附录1 单机无穷大系统数学模型参数表达式

$$x_s = x_t + x_L; \quad x_{d\Sigma} = x_d + x_s; \quad x_{q\Sigma} = x_q + x_s;$$

$$K_1 = \frac{U_{t0} x_s}{U_{t0} x_{d\Sigma}}; \quad K_2 = \frac{U_s}{U_{t0}} \left(\frac{U_{t0} x_q \cos \theta_0}{x_{q\Sigma}} - \frac{U_{t0} x_d \sin \theta_0}{x_{d\Sigma}} \right);$$

$$K_3 = \frac{x_s}{U_{t0}^2} \left(\frac{U_{t0}^2 x_d}{x_{q\Sigma}} + \frac{U_{t0}^2 x_q}{x_{d\Sigma}} \right); \quad K_4 = \frac{x_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma}} I_{\varphi 0};$$

$$K_5 = (E_{\varphi 0} + I_{\varphi 0} (x_q - x_d)) \frac{U_s \cos \theta_0}{x_{q\Sigma}} +$$

$$(x_q - x_d) I_{d0} \frac{U_s \sin \theta_0}{x_{d\Sigma}}$$

$$K_6 = (E_{d0} + I_{d0}(x_q - x_d)) \frac{x_s U_{t,d0}}{x_{q\Sigma} U_{t0}^2} -$$

$$(x_q - x_d) I_{d0} \frac{x_s U_{t,d0}}{x_{d\Sigma} U_{t0}^2};$$

$$K_7 = \frac{x_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma} T_{d0}}; K_8 = - \frac{(x_d - x_q) U_s \sin \theta_0}{x_{d\Sigma} T_{d0}};$$

$$K_9 = - \frac{(x_d - x_q) x_s U_{t,d0}}{x_{d\Sigma} U_{t0}^2 T_{d0}}; K_{10} = \frac{K_1}{K_5 K_1 - K_4 K_2};$$

$$K_{11} = \frac{-K_4}{K_5 K_1 - K_4 K_2}; K_{12} = \frac{K_3 K_4 - K_1 K_6}{K_5 K_1 - K_4 K_2};$$

$$K_{13} = \frac{-K_5 K_1 + K_4 K_2}{T_j K_1}; K_{14} = - \frac{D}{T_j}; K_{15} = - \frac{K_4}{T_j K_1};$$

$$K_{16} = \frac{K_4 K_3 - K_6 K_1}{T_j K_1}; K_{17} = K_1 K_8 - K_7 K_2;$$

$$K_{18} = K_1 K_9 - \frac{K_3}{T_Q} - K_7 K_3; K_{19} = \frac{K_3}{T_Q};$$

$$K_{20} = \frac{-K_{12} T_Q - K_{11} K_{19}}{K_{10} T_Q} + \frac{-K_{11} K_{12} K_{17} T_Q - K_{18} K_{11} T_Q + K_{12}}{K_{10} T_Q};$$

$$K_{21} = \frac{-K_{11}^2 K_{17} - K_7 K_{11}}{K_{10}}; K_{22} = K_{19} + K_{12} K_{17} + K_{18};$$

$$K_{23} = K_{12} K_{13} + K_{16}。$$

式中, x_d 、 x_d' 、 x_q 分别表示 d 轴同步电抗、次同步电抗、 q 轴电抗; U_{t0} 、 $U_{t,d0}$ 、 $U_{t,d0}$ 分别表示发电机机端电压初值、发电机机端 q 轴电压初值和发电机机端 d 轴电压初值; I_{d0} 、 E_{d0} 、 D 、 T_j 分别表示定子电流 q 轴分量初值、次暂态电势初值、阻尼系数和发电机惯性时间常数。

参 考 文 献

[1] 余贻鑫,李 鹏. 大区电网互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6-11.
YU Yi-xin, LI Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11.

[2] 严伟佳,蒋 平. 抑制区域间低频振荡的 FACTS 阻尼控制[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 189-192.
YAN Wei-jia, JIANG Ping. Damping control with FACTS aiming at damping inter-area oscillation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 189-192.

[3] Noroozian M, Andersson G. Damping of inter-area and local modes by use of controllable components[C] IEEE/ PES Winter Meeting Paper. New York, USA: IEEE, 1995.

[4] Zhu Fang, Liu Zenghuang, Chu Liu. Achievement and experience of improving power system stability by PSS/excitation control in China[C] IEEE PES 2004 General Meeting. Denver, USA: IEEE, 2004.

[5] 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.

[6] 范 澍,毛承雄,陆继明,等. 多机电力系统神经网络最优励磁控

制器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 80-83.
FAN Shu, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, et al. Neural network based optimal excitation controller for multi-machine power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 80-83.

[7] 刘兴杰,米增强,杨奇逊. 基于广域测量的双模糊励磁控制[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 107-110.
LIU Xing-jie, MI Zeng-qiang, YANG Qi-xun. Double fuzzy excitation controller based on wide-area measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(4): 107-110.

[8] Hu Zhaoqing, Mao Chengxiong, Lu Jiming, et al. Grey excitation controller for synchronous generator[J]. The Journal of Grey System, 2004, 16(1): 51-58.

[9] 李 鹏,刘明波. 基于神经网络的模型跟踪自校正励磁控制器[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(1): 36-38.
LI Peng, LIU Ming-bo. The design of model tracking self-tuning excitation controller using neural networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(1): 36-38.

[10] Lasseter ID, Jalali S G. Dynamic response of power conditioning systems for super-conductive magnetic energy storage[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1991, 16(3): 388-393.

[11] Mithulananthan N, Canizares C A, Reeve J, et al. Comparison of PSS, SVC, and STATCOM controllers for damping power system oscillations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 786-792.

[12] 袁佳歆,陈柏超,万 黎,等. STATCOM 优化控制的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(增): 118-119.
YUAN Jia-xin, CHEN Bai-chao, WAN Li, et al. The optimized controlling of the static synchronous compensator[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(S1): 118-119.

[13] Veas D R, Dixon J W, Boon Teck Ooi. A novel load current control method for a leading power factor voltage source PWM rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1994, 9(2): 153-159.

[14] Yan Guo, Xiao Wang, Lee H C, et al. Pole-placement control of voltage-regulated PWM rectifiers through real-time multi-processing[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1994, 41(2): 224-230.

[15] Green A W, Boys J T, Gates G F. 3-phase voltage sourced reversible rectifier. electric power applications[J]. IEE Proceedings - B: Electric Power Applications, 1998, 135(6): 362-370.

[16] Espinoza J, Joos G. State variable decoupling and power flow control in PWM current-source rectifiers[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1998, 45(1): 78-87.

[17] Espinoza J R, Joos G, Moran L. Decoupled control of the active and reactive power in three-phase PWM rectifiers based on non-linear control strategies[C] 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. South Carolina, USA: IEEE, 1999: 131-136.

[18] 张崇巍,张 兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[19] Xi Zhengping, Bhattacharya S. STATCOM control and operation with series connected transformer based 48-pulse VSC[C] The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). Taipei, China: IEEE, 2007: 1714-1720.

[20] Wu R, Dewan SB, Slemon GB. A PWM AC-to DC converters with fixed switching frequency[J]. IEEE Trans on Ind Appl,

1990, 26(5): 880-885.

- [21] 余江. 典型超导电力装置的运行特性和数学模型与控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2002.
- [22] 卢强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [23] 苏建设, 柯宁, 陈陈. 提高暂态稳定的励磁与 FACTS 协调策略设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 6-10.

SU Jian-she, KE Ning, CHEN Chen. Coordinated design of



HE Li-na

何丽娜

1984—女

研究方向为大型同步发电机的控制, 大功率电力电子技术在电力系统中的应用及电力系统动态仿真研究

电话: (027) 87542669

E-mail: helina0116@gmail.com



MAO Cheng-xiong
Ph. D., Professor

毛承雄

1964—男, 博士, 教授, 博导

研究方向为大型同步发电机的控制, 大功率电力电子技术在电力系统中的应用及电力系统动态仿真研究

E-mail: cxmao@263.net

generator excitation and facts for transient stability enhancement[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 6-10.

- [24] 刘前进, 黎雄, 孙元章. 基于 PSASP 程序的 FACTS 潮流建模[J]. 电网技术, 2000, 24(7): 6-9.

LIU Qian-jin, LI Xiong, SUN Yuan-zhang. Power flow modeling of facts based on psasp[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 6-9.



LU Ji-ming
Professor

陆继明

1956—男, 教授

研究方向为大型同步发电机的控制, 大功率电力电子技术在电力系统中的应用



WANG Dan
Ph. D.

王丹

1977—男, 博士

研究方向为大型同步发电机的控制, 大功率电力电子技术在电力系统中的应用

收稿日期 2008-12-10 修回日期 2009-05-23 编辑 陈蔓