

# 同步发电机的新型励磁系统

吴建东, 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重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 为提高电力系统的暂态稳定性, 提出一种基于全控器件的新型励磁系统. 该励磁系统能通过直流励磁和与机端交换无功的双通道为系统提供阻尼, 起到 STATCOM 和常规励磁的效果. 通过 PSASP 环境下多机系统的仿真研究, 表明新型励磁系统能够迅速阻尼功率振荡, 维持良好的机端电压特性, 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; 励磁系统; 同步发电机; 低频振荡

**中图分类号:** TM 712      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1673-9140(2009)01-0012-07

## Novel excitation system of synchronous generator

WU Jian-dong, HE Li-na, MAO Cheng-xiong, LU Jiming, WANG Dan

(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 transient stability of power system at present, this paper presents a novel excitation system based on full controlled devices rectifier. It can damp oscillation by two channels, DC excitation and exchanging reactive with generator terminal, and it can be equaled to STATCOM and A. C. exciter. Simulation results of Multi-machine power system with PSASP show that the novel excitation system can quickly damp power oscillation and maintain well voltage characteristics of generator terminal, and have the better dynamic performance than traditional excitation system.

**Key words:** full controlled devices; excitation system; synchronous generator; low-frequency oscillations

随着三峡工程和特高压线路的投运, 我国实现跨区大电网互联, 在实现电力资源的优化配置、提高系统发电和输电经济性和可靠性的同时, 也会带来

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, 如东北 - 华北 - 华中 - 川渝联合跨区电网存在一个频率为

收稿日期: 2009-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(50837003); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2009CB219702)

作者简介: 吴建东(1965-), 男, 博士研究生, 主要从事大型同步发电机的控制, 大功率电力电子技术 in 电力系统中的应用及电力系统动态仿真研究.

通讯作者: 毛承雄, 男, 博士, 教授, 博士生导师; E-mail: cxmao@263.net

0.13 Hz 的区域振荡模式, 其中川渝连同华中系统为一方, 与华北、东北全部机组为另一方之间进行振荡<sup>[1]</sup>。此外, 我国电网也存在较多长距离送电的情况, 如三峡上游正在建设的巨型机组, 长距离送电对机组稳定性的影响尤为突出<sup>[2~6]</sup>。

目前, 抑制电力系统低频振荡的方法, 大致可分为两类: 一次系统对策和二次系统对策。其中, 一次系统对策主要有: 减少重负荷输电线、减少送受端的电气距离、采用直流输电以及在输电线上装设 FACTS (Flexible AC Transmission System); 二次系统的对策主要为: 励磁控制系统采用附加控制装置, 如电力系统稳定器 (Power System Stabilizer, PSS)<sup>[7]</sup>等; 另外, 也在积极探索新的抑制方法<sup>[8~12]</sup>。

在一次系统采取措施, 可以有效提高系统稳定性、改善阻尼、提高输送能力等, 但一次系统措施成本较高, 难度较大。如能在一次系统采取措施的同时, 改进大型同步发电机的励磁控制系统及控制策略, 将使得系统的改善效果更加显著, 同时成本也会大幅度降低。理论和实践已经证明改善励磁控制措施是提高系统稳定性和改善系统阻尼的一种非常简单、有效的方法<sup>[2~12]</sup>。

励磁系统作为同步发电机的一个重要组成部分, 除了能够在正常情况下维持发电机机端电压在给定水平、实现并联运行发电机组之间无功功率的合理分配, 还能通过调节励磁电流的大小提供正阻尼抑制电力系统的低频/超低频振荡。基于可控硅整流的励磁控制系统只能通过控制直流励磁来增强阻尼, 若要兼顾抑制低端 0.1 Hz 和高端 3 Hz 的振荡, 给励磁控制器参数的整定带来很大困难<sup>[13,14]</sup>。此外, 电力系统大幅低频/超低频振荡期间, 发电机机端电压也随之大幅低频/超低频振荡, 有可能较长时间 (几秒钟) 持续处于较低水平 (特别是超低频振荡)。基于可控硅整流的励磁系统所能提供的励磁容量有限, 一旦不足以维持机端电压在给定水平, 将容易诱发电力系统大型事故。

本文提出基于全控器件 (如: IGBT、IGCT、GTO 等) 整流的新型励磁系统, 该新型励磁系统不仅可以通过直流励磁为系统提供阻尼, 还可以充分利用全控器件构成的整流桥的交流侧直接向同步发电机端送出和吸收无功的特点, 实现其与同步发电机直流励磁的协调控制, 为同步发电机和电力系统提供更快控制和更多阻尼。从目前国内外文献看, 还没有

对基于全控器件的励磁系统开展系统深入的研究, 励磁系统应用全控器件主要是用于直流斩波, 采用占空比调制<sup>[15~17]</sup>。

与可控硅构成的整流桥励磁系统相比, 基于全控器件的新型励磁系统的优点可分为以下几条:

① 直流侧在提供同步发电机直流励磁电流的同时, 其交流侧可以向同步发电机端发出或吸收无功, 而可控硅构成的整流桥无论在整流状态和逆变状态都从机端吸收无功;

② 在电力系统大幅低频/超低频振荡期间, 全控器件整流构成的自并励励磁系统具备升压能力, 可以维持较好的励磁水平, 故基于全控器件的新型自并励励磁系统可以达到他励励磁系统的控制效果;

③ 新型自并励励磁系统有 2 个自由控制量: 励磁电流和其交流侧无功 (该量由全控器件整流系统的控制量—调制比、相位变换而来); 而可控硅励磁系统的控制量只有 1 个—导通角;

④ 全控器件开关频率比可控硅要高很多, 所产生的谐波要小很多;

⑤ 基于全控器件构成的整流桥在逆变时没有换相失败问题。

## 1 新型励磁系统的原理

基于全控器件的新型励磁系统利用全控器件换流器为发电机提供励磁。全控器件换流器直流侧为发电机提供直流励磁的同时, 交流侧能与发电机机端进行无功功率正负灵活调节。通过适当的控制励磁电流和交流侧无功, 能共同为系统提供阻尼, 维持机端电压在给定水平, 提高电力系统的稳定性。新型励磁系统的原理框图如图 1 所示。

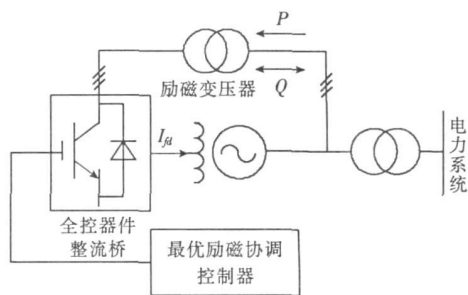


图 1 基于新型励磁的同步发电机系统

Figure 1 Synchronous generator system based on novel excitation system

目前,常规自并励磁系统的功率单元均采用可控硅换流器,该换流器在为发电机提供直流励磁的同时,其交流侧需要从系统吸收无功功率.当系统故障机端电压降低时,励磁系统为了维持机端电压在给定水平,需要增加励磁.同时,功率单元的可控硅换流器工作时需要从机端吸收无功功率,不利于机端电压的维持.

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如图2所示<sup>[18-20]</sup>.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.

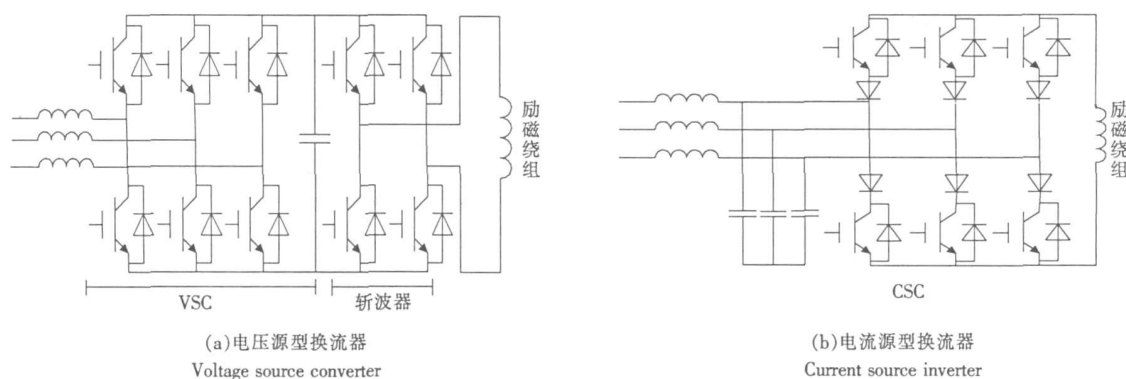


图2 电压源型换流器和电流源型换流器

Figure 2 Voltage source converter and current source inverter

## 2 新型励磁系统改善电力系统阻尼特性的机理及其等效模型

### 2.1 新型励磁系统改善阻尼特性的机理

常规励磁系统的附加控制器 PSS 能够提供正阻尼,主要就是通过相位超前环节保证引入信号所提供的转矩方向与发电机转速偏差方向一致,从而产生正阻尼.

新型励磁系统有 2 条通道提供阻尼,通道 1:与常规励磁系统一样根据电力系统振荡情况可以通过调节直流励磁电流的大小提供正阻尼;通道 2:可以通过对发电机端的无功吸收和释放进行,初步理论分析可知“通道 2”的无功吸收和释放会直接导致机端电压增减,根据“等面积定则”可知机端电压增减将直接影响发电机转子的加速和减速面积,因此只要通过适当控制,“通道 2”能够提供正阻尼.

通过分析研究,可知“通道 1”是通过改变发电机内电势(励磁调节)来影响发电机转子的加速和减速面积,而“通道 2”是通过改变发电机端电压(无功调节)来影响发电机转子的加速和减速面积.因“通道 1”是通过发电机励磁绕组调节,而励磁绕组具有很大的时间常数(s 级),而“通道 2”直接作用于机端,基本无时延(ms 级),故“通道 2”将比“通道 1”具有快得多的控制速度来抑制低频/超低频振荡.

由于自并励磁方式具有许多突出优点,如:大轴短、生产周期短、成本低以及维护方便等,我国水电机组(包括新建火电机组)都是采用自并励磁方式.但是电网发生低频/超低频振荡时,发电机机端电压也将随着大幅低频/超低频振荡,使得机端电压有可能较长时间(几秒钟)持续处于较低水平,特别是处在振荡中心的机组.如果在振荡期间系统发

生短路故障或需要增发无功, 需要励磁系统强行励磁或加大励磁, 有可能出现励磁能力不足而导致系统事故扩大化. 在这种情况下, 由于全控器件励磁系统具有良好直流升压能力, 将能很好保证足够的励磁能力.

### 2.2 新型励磁系统的等效模型

满足新型励磁系统功率单元需求的换流器有 VSC 和 CSC, 本文将侧重研究基于 VSC 的新型励磁系统. 根据 VSC 的前期研究, VSC 通过  $d, q$  解耦控制维持直流侧电压恒定和交流侧的无功电流<sup>[21]</sup>.

从文献 [22] 可知, VSC 交流侧电压大范围变化时, 其直流侧电压依然能维持恒定. 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, 在一定程度上可等效为恒压源通过斩波电路为系统提供励磁, 即它励励磁系统. 同时, 通过控制 VSC 交流侧无功电流, 实现交流侧与发电机机端的无功功率的控制, 以期快速阻尼功率振荡, 维持机端电压在给定水平.

结合新型励磁系统改善阻尼特性的机理, 以及 VSC 工作特性, 新型励磁系统可等效为它励励磁系统和 STATCOM<sup>[22]</sup>, 其等效模型如图 3 虚线框所示.

### 3 新型励磁系统的单机无穷大系统建模

基于全控器件的新型励磁系统的单机无穷大系统如图 3 所示.

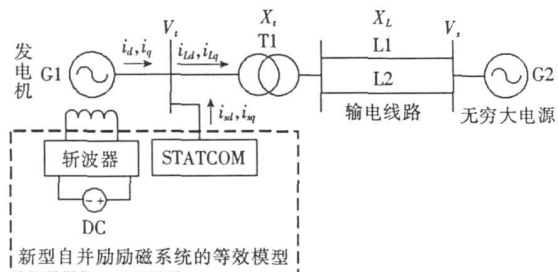


图 3 基于新型励磁系统的单机无穷大系统

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

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, 故与系统交换的无功功率的动态特性可仿效 STATCOM 等效为一阶模型 STATCOM, 其具体

表达式:

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

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 ~40 ms<sup>[23]</sup>.

在建立线性化模型时, 对发电机进行简化: ①忽略阻尼效应; ②忽略定子绕组电阻; ③不考虑定子绕组和负荷的动态过程; ④不考虑饱和效应. 同步发电机可用三阶微分方程描述, 即励磁绕组一阶、转子运动方程两阶, 以  $d, q$  坐标系表示的系统方程为

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0, \\ T_j \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - P_D, \\ T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} = E_f - E_q = E_f - E_q' - (x_d - x_d')i_d. \end{cases} \quad (2)$$

将式 (1), (2) 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如式 (3) 所示, 具体表达式:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_e \\ \Delta \omega \\ \Delta V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_{11}K_{17} & \frac{1 - K_2K_{11}}{K_{10}} & K_{21} \\ K_{10}K_{13} & K_{14} & K_{11}K_{13} + K_{15} \\ K_{10}K_{17} & K_2 & K_{11}K_{17} + K_7 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P_e \\ \Delta \omega \\ \Delta V_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{K_{11}}{K_{10}T_{d0}} & K_{20} \\ 0 & K_{23} \\ \frac{1}{T_{d0}} & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{fd} \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中

$$K_1 = \frac{V_{tq0}x_s}{V_0x_d\Sigma},$$

$$K_2 = \frac{V_s}{V_0} \left( \frac{V_{td0}x_q \cos \hat{\theta}}{x_q\Sigma} - \frac{V_{tq0}x_d \sin \hat{\theta}}{x_d\Sigma} \right),$$

$$K_3 = \frac{x_s}{V_0} \left( \frac{V_{td0}^2 x_q}{x_q\Sigma} + \frac{V_{tq0}^2 x_d}{x_d\Sigma} \right),$$

$$K_4 = \frac{x_q \Sigma}{x_d \Sigma} I_{\phi 0},$$

$$K_5 = [E_{\phi 0}' + I_{d0} (x_q - x_d')] \frac{V_s \cos \hat{\delta}}{x_q \Sigma} + (x_q - x_d') I_{\phi 0} \frac{V_s \sin \hat{\delta}}{x_d \Sigma},$$

$$K_6 = [E_{\phi 0}' + I_{d0} (x_q - x_d')] \frac{x_s V_{t0}}{x_q \Sigma V_{t0}^2} - (x_q - x_d') I_{\phi 0} \frac{x_s V_{t0}}{x_d \Sigma V_{t0}^2},$$

$$K_7 = - \frac{x_d \Sigma}{x_d \Sigma T_d},$$

$$K_8 = - \frac{(x_d - x_d') V_s \sin \hat{\delta}}{x_d \Sigma T_d},$$

$$K_9 = - \frac{(x_d - x_d') x_s V_{t0}}{x_d \Sigma V_{t0}^2 T_d},$$

$$K_{10} = \frac{K_1}{K_5 K_1 - K_4 K_2},$$

$$K_{11} = \frac{-K_4}{K_5 K_1 - K_4 K_2},$$

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

$$K_{13} = \frac{-K_5 K_1 + K_4 K_2}{T_j K_1},$$

$$K_{14} = - \frac{D}{T_j},$$

$$K_{15} = - \frac{K_4}{T_j K_1},$$

$$K_{16} = \frac{K_4 K_3 - K_6 K_1}{T_j K_1},$$

$$K_{17} = K_1 K_8 - K_7 K_2,$$

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

$$K_{19} = \frac{K_3}{T_Q},$$

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

$$x_s = x_T + x_L, \quad x_d \Sigma = x_d' + x_s,$$

$$x_q \Sigma = x_q + x_s.$$

式(3)中控制变量有:  $\Delta E_{fd}$  和  $\Delta Q$ , 其中  $E_{fd}$  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。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。

## 4 PSASP环境下多机系统中的仿真研究

本文选取某实际电网为多机系统计算网络, 研究与系统关键振荡模式强相关的机组 G, 在 PSASP 环境下建立该机组对应的新型励磁系统的潮流模型与暂态模型<sup>[24]</sup>, 对比原有励磁系统进行扰动分析, 验证新型励磁系统阻尼功率振荡, 维持机端电压水平的能力。

仿真中系统基准容量为 100MVA, 设置新型励磁系统强励顶值电压为额定励磁电压的 2 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。仿真基于 PSASP6.25 环境, 发电机 G 的参数、新型励磁系统及常规自并励励磁系统的参数(标么值)如表 1~4 所示, 其中调速器采用 PSASP 中 1 型调速器, AVR 采用 PSASP 中 12 型 AVR, 具体参数如表 2, 3 所示。(以下参数均为发电机 G 的实际运行参数)

表 1 发电机 G 参数

Table 1 Generator G parameters in p. u.

发电机	$x_d'$	$x_d$	$x_q$	$T_d'$	$T_j$
G	0.0468	0.34	0.331	7.5 s	58.68 s

表 2 调速器参数

Table 2 Parameters of the governor on each of the generating units

参数	$\hat{\delta}$	$T_S$	$\epsilon$	$T_0$	$\alpha$	$T_h$
数值	5.00%	0.50	0.001	0.20 s	0.333	8.40

实验中扰动设置为发电机 G 出口母线高压侧 (500 kV) 1 s 三相短路, 1.1 s 故障解除。发电机 G 采用新型自并励励磁系统和原自并励励磁系统的仿真结果如图 5 所示, 其中包括发电机功角曲线、机端电压曲线和新型励磁系统与发电机机端交换的无功功率曲线。

表 3 常规自并励励磁系统 AVR + PSS 控制器参数

(b) PSS 控制器参数

(b) Parameters of the PSS

Table 3 Parameters of the AVR and PSS of the conventional bus fed static excitation system

(a) AVR 控制器参数

(a) Parameters of the AVR

参数	$K_W$	$K_P$	$T_R$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$
数值	0.00	2.00	0.01	0.30	10.00	0.10	0.10	0.10	0.10

参数	$X_C$	$T_r$	$K_a$	$T_a$	$K$	$K_v$	
数值	-0.009 5	0.02 s	1.00	0.01 s	500.00	1.00	
参数	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$K_c$	$K_f$	$T_f$
数值	1.59	13.25	0.10	0.10	0.102	0.00	1.00 s

表 4 新型励磁控制器参数

Table 4 Parameters of the novel excitation controller

参数	$K_{fp}$	$K_{fv}$	$K_{fv}$	$K_{Qp}$	$K_{Qw}$	$K_{Qv}$	$E_{fdmax}$	$Q$
数值	2.070 9	-400.00	6.80	0.001	-50.00	8.00	5.484 8	0.4

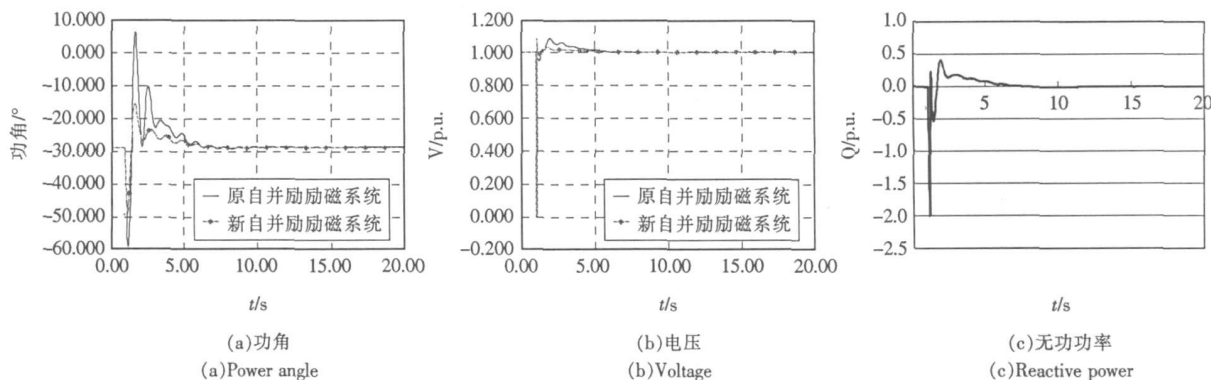


图 4 发电机出口三相短路的系统响应

Figure 4 Response of three-phase fault at the terminals of generator

由图 4 可知, 基于新型励磁系统的发电机机端故障时, 能迅速阻尼振荡, 维持机端电压在给定水平, 表现出良好的阻尼特性, 改善了发电机励磁性能, 有效提高了电力系统的稳定性. 其中, 无功功率曲线显示: 系统故障, 机端电压大幅变化时, 新型励磁系统对发电机机端系统进行迅速的无功功率补偿, 满足系统无功功率的需求, 维持机端电压在给定水平.

## 5 总结

本文初步提出了基于全控器件的新型励磁系统, 分析了新型励磁系统改善阻尼特性的机理. 通过多机系统的大扰动研究, 新型励磁系统对于常规励磁系统表现出良好的动态特性.

基于全控器件的新型励磁系统有着较好的研究潜力, 有望提高电力系统运行稳定性及远距离输送能力, 在很多方面都需要进一步深入研究, 如新型励磁系统的优化、协调控制策略、最佳容量的确定等.

## 参考文献:

[1] 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.

[2] 朱方, 赵红光, 刘增煌, 等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (1): 1-7.  
ZHU Fang, ZHAO Hong-guang, LIU Zeng-huang, et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (1): 1-7.

[3] Milanovic J V. Damping of the low-frequency oscillations of the generator: dynamic interactions and the effectiveness of the controllers [J]. IEE Proceeding of Generation, Transmission and Distribution, 2002, 6 (149): 753-759.

[4] Noroozian N, Andersson G. Damping of inter-area and local modes by use of controllable components [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10 (4): 2 007-2 012.

[5] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱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]. Proceeding of the CSEE, 2005, 25 (11): 6-11.

[6] 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.

[7] 黄莹, 徐政, 潘武略. 基于 PSS/E 的华东电网低频振荡分析方法 [J]. 电网技术, 2005, 29 (23): 11-17.

- HUANG Ying, XU Zheng, PAN Wu-lue. Analysis method for low frequency oscillation in East China power grid based on power system simulation software PSS/E [J]. Power System Technology, 2005, 29 (23): 11-17.
- [8] Mithulananthan N, Canizares C A, Reeve J, et al. Comparison of PSS, SVC, and STATCOM controllers for damping power system oscillations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (2): 786-792.
- [9] Lasseter I D, Jalali S G. Dynamic response of power conditioning systems for super-conductive magnetic energy storage [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991, 16 (3): 388-393.
- [10] 程时杰, 余文辉, 文幼宇, 等. 储能技术及其在电力系统稳定控制中的应用 [J]. 电网技术, 2007, 31 (20): 97-100.  
CHENG Shi-jie, YU Wen-hui, WEN Jin-yu, et al. Energy storage and its application in power system stability enhancement [J]. Power System Technology, 2007, 31 (20): 97-100.
- [11] 杜文娟, 王海风. 应用储能系统抑制电力系统低频振荡原理研究 [J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23 (1): 31-35, 55.  
DU Wen-juan, WANG Hai-feng. Research on the principle of energy storage system damping power system oscillations [J]. Journal of Electric Power and Technology, 2008, 23 (1): 31-35, 55.
- [12] 王少荣, 彭小涛, 唐跃进, 等. 电力系统稳定控制用高温超导磁储能装置及实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (22): 44-48.  
WANG Shao-rong, PENG Xiao-tao, TANG Yue-jin, et al. Apparatus and experiment of high temperature superconducting magnetic energy storage used for power system stability enhancement [J]. Proceeding of the CSEE, 2007, 27 (22): 44-48.
- [13] 王青, 闵勇, 张毅威. 超低频区间振荡现象的机理分析 [J]. 继电器, 2006, 34 (12): 63-68.  
WANG Qing, MIN Yong, ZHANG Yi-wei. Mechanism analysis of ultra low frequency inter-area oscillation [J]. Relay, 2006, 34 (12): 63-68.
- [14] 孙景强, 陈志刚, 曹华珍. 南方电网2010年低频振荡问题 [J]. 电网技术, 2007, 31 (2): 93-96.  
SUN Jing-qiang, CHEN Zhi-gang, CAO Hua-zhen, et al. Analysis on low-frequency oscillation of South China power grid in 2010 [J]. Power System Technology, 2007, 31 (2): 93-96.
- [15] 董锋斌, 皇金锋. 斩波技术在小型水电站励磁改造系统中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (7): 78-80.  
DONG Feng-bin, HUANG Jin-feng. Application of chopped wave technique in excitation system reconstruction of small hydropower plant [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (7): 78-80.
- [16] 李军, 李华峰. 基于斩波控制的新型励磁系统 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (7): 13-17.  
LI Jun, LI Hua-feng. Novel excitation system based on chopped wave control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (7): 13-17.
- [17] 宋俊涛, 刘涤尘, 刘芳芳. 基于 IGBT 的自并励开关式励磁系统的研究 [J]. 电气传动, 2002, 49 (10): 42-43.  
SONG Jun-tao, LIU Di-chen, LIU Fang-fang. The research of self-shunt excitation system based on the IGBT [J]. Electric Drive, 2002, 49 (10): 42-43.
- [18] 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.
- [19] Yan Guo, Xiao Wang, Lee H C, et al. Pole-placement control of voltage-regulated PWM rectifiers through real-time multiprocessing [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1994, 41 (2): 224-230.
- [20] Green A W, Boys J T, Gates G F. 3-phase voltage sourced reversible rectifier [J]. IEE Proceedings B of Electric Power Applications, 1988, 135 (6): 362-370.
- [21] 贾贵玺, 董钺, 张臣堂. 基于 PWM 控制的发电机励磁系统 [J]. 天津大学学报, 2005, 38 (10): 874-877.  
JIA Gui-xi, DONG Yue, ZHANG Chen-tang. PWM-based excitation system of generators [J]. Journal of Tianjin University, 2005, 38 (10): 874-877.
- [22] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [23] 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 Taipei, Taiwan, China, 2007.
- [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.