

# 具有电流前馈的中频无刷励磁控制系统及其实现

周德佳<sup>1</sup> 庄亚平<sup>1</sup> 冀路明<sup>1</sup> 徐定海<sup>1</sup> 李江<sup>2</sup>

(1. 海军装备研究院 北京 100161 2. 七〇四研究所 上海 200033)

**摘要** 精密品质的 400Hz 船用中频供电系统是特种装备可靠运行的重要保障, 研究高性能的中频同步发电机励磁控制策略和工程应用非常重要。本文分析了中频供电系统瞬变电压调整特性, 提出了具有电流前馈的中频无刷励磁系统 PID 控制算法, 能够对励磁机的时间常数进行一定的补偿, 降低其滞后效果, 因此增加了励磁系统小信号响应带宽的能力, 以满足中频供电系统在突加或突卸负载的工况下, 中频发电机机端输出瞬变电压具有快速的恢复时间。实验结果与仿真相符合, 系统输出电压具有良好的动稳态性能, 表明了所提出的控制方案是有效的。

**关键词:** 中频 同步发电机 励磁控制 电流前馈

**中图分类号:** TM615

## Implementation of a Brushless Excitation System With Current Feed-Forward Control for Medium Frequency Electrical System

Zhou Dejia<sup>1</sup> Zhuang Yaping<sup>1</sup> Ji Luming<sup>1</sup> Xu Dinghai<sup>1</sup> Li Jiang<sup>2</sup>

(1. Navy Academe of Armament Beijing 100161 China 2. 704 Institute Shanghai 200033 China)

**Abstract** It is very important to study medium frequency synchronous generator's excitation control strategy and application in shipboard, for it can guarantee the safe operation of special equipment in high quality 400Hz medium frequency electrical system. In order to make the medium frequency synchronous generator terminal's transient voltage restores as quickly as possible under the circumstances of suddenly increased and decreased load, this paper analyzes regulating property of the transient voltage of medium frequency electrical system and puts forward PID with current feed-forward controlling algorithm for medium frequency brushless excitation system, which compensates the exciter time constant to some extent, decreases its delaying effect, and increases the small signal response bandwidth of the excitation system. The simulation and experimental results verify the effectiveness of the proposed algorithm, which demonstrate that the proposed control system has good dynamic stability and steady-state performance.

**Keywords:** Medium frequency, synchronous generator, excitation control, current feed-forward

收稿日期 2010-08-05 改稿日期 2011-02-16

## 1 引言

同步发电机励磁控制是确保舰船用独立电力系统电能品质最关键的控制手段之一, 是一个非常重要的研究领域。民用电力系统同步发电机励磁控制

主要以单机无穷大系统为背景进行研究, 其控制方法有基于线性传递函数模型的单变量设计、多变量设计, 基于状态空间模型的多变量优化设计, 鲁棒控制, 自适应控制, 智能控制以及多种控制方法的综合应用等, 目标是解决大型电力系统安全与稳定性问题<sup>[1-2]</sup>。舰船用 400Hz 中频供电系统容量有限, 一般在几十千瓦至几百千瓦的功率范围内, 不但要

确保舰船用中频独立供电系统的安全与稳定运行,而且对发电机机端的稳态电压、瞬变电压以及电压恢复时间有着更加严格的标准规定<sup>[3]</sup>,因此需要对舰船用中频同步发电机的励磁控制在普遍性原理的基础上开展其特殊性研究。

随着现代电力电子技术的发展,舰船用同步发电机采用无刷励磁控制方式已经成为趋势,它具有结构紧凑、电路简单、控制方便、运行可靠、维护量小,适宜于防爆、防尘、防盐雾等特殊场合使用<sup>[2-5]</sup>。为此,本文分析了中频无刷励磁同步发电机系统瞬变电压调整特性,采用 Clark 3/2 坐标变换快速计算系统机端输出线电压和相电流的有效值,以便于对机端输出的线电压进行闭环控制;针对中频发电系统负载突变时,励磁机调节电压响应存在一定的延时,提出了具有电流前馈的 PID 励磁控制算法,以减少发电机励磁回路的时间常数所引起滞后延时,使系统在各级负载突加或突卸的工况下,机端线电压具有较快的恢复时间和良好的动稳态响应。仿真与试验结果相符合,充分说明了所提出的控制方案是有效可行的。

## 2 中频供电系统瞬变电压调整特性

电动机启动是舰船中频供电系统主要的瞬变电压扰动源,美海军军标 MIL-M-19097、MIL-M-19160 和 MIL-M-19633 规定 60Hz 交流-400Hz 交流电动中频发电机组瞬变电压变化和恢复时间有着严格的指标:当负载功率因数为 0.8,发电机从空载突加至半载、从半载突加至满载、从满载突卸至半载和从 3/4 负载突卸至 1/4 负载时,发电机机端瞬变电压降或电压升不大于额定电压的 9%,恢复和保持在稳态电压额定值的  $\pm 0.5\%$  以内的时间不大于 0.5s<sup>[3]</sup>。负载突然加在一台中频同步发电机上产生的电压跌落主要由负载的大小和功率因数、发电机特性以及发电机励磁系统特性三个因素决定。当负载突变时,为了在起始阶段使励磁系统输出的调节电压有很好的初始响应,非常有必要在中频同步发电机设计制造前分析好各因素的影响,并确定其中各个因素的相对重要程度。

中频供电系统多数负载为电动机,系统瞬变电压下降或上升主要是由于电动机的频繁启动与停止所引起的,瞬变电压下降或上升的程度主要取决于电动机启停控制的频率如何<sup>[3]</sup>,因此,电动机驱动宜采用现代高性能的矢量控制或直接转矩控制以对

电动机的频率进行精确的控制,可使瞬变电压恢复时间不超过 2s,但是要使瞬变电压恢复时间小于 0.5s,还将取决于发电机的额定容量、励磁系统类型以及所采用的具体控制算法。配置自动电压调节器(AVR)的同步交流发电机当遇到突加或突卸负载时因超瞬变电流和瞬变电流的共同作用将会发生瞬时电压跌落或上升,其最大电压降(或升)

$|\Delta V|$  一般发生在 5~8 个周波瞬变范围内,超瞬变电流分量一般在 2~3 个周波内衰减完,因此最大电压降(或升)  $|\Delta V|$  与同步发电机的超瞬变电抗值  $x_d''$ 、瞬变电抗值  $x_d'$  都有关,与调压器的工作几乎无关。 $x_d''$  和  $x_d'$  取值偏小时可降低最大电压降(升)

$|\Delta V|$  的大小,

使其符合标准同时可使瞬变电压衰减至稳态更快。

同步发电机的  $x_d''$  决定了系统短路电流的大小,在舰船独立电力系统中,应尽可能使  $x_d''$  保持为高值,以

使系统短路电流减至最低值<sup>[3]</sup>。AVR 调压器控制能力决定随后的电压瞬变阶段的衰减直至稳态阶段的恢复时间。根据磁通不能瞬时突变的原则,任何突然增加的电枢电流所产生的去磁效应都必须通过一份励磁电流来抵消,比如当发电机的电枢绕组在突加负载的情况下,发生的磁场电流增加将会减少励磁回路的有效电感  $x_{ad}$  值(因为磁通保持不变而磁场电流却增加了),根据纵轴瞬变电抗的等效电路

(见图 1)可知纵轴瞬变电抗  $x_d'$  值将有所降低,继

而励磁回路瞬变电流衰减的时间常数  $T_d'$  的也随之降

低,反之,当负载突卸时  $T_d'$  将有所增加,其计算式

为

$$T_{d1}' = \frac{x_d'}{x_d} T_{d0}' \quad (1)$$

式中  $T_{d0}'$  ——励磁绕组的时间常数,  $T_{d0}' = \frac{X_{fd}}{R_{fd}}$ ;

$x_d$  ——定子绕组纵轴电抗<sup>[3,6]</sup>,

$$x_d' = x_1 + \frac{x_{ad}x_{fl}}{x_{ad} + x_{fl}};$$

$x_1$  ——同步发电机定子绕组的漏抗;

$x_{fl}$  ——励磁绕组的漏抗;

$x_{ad}$ ——纵轴电枢反应电抗。

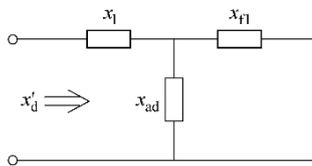


图1 纵轴瞬变电抗等效电路<sup>[6]</sup>

Fig.1 D-axis transient reactance's equivalent circuit

旋转无刷励磁调节器响应时间与静止型晶闸管调节器工作时间相当 ( $< 3\text{Hz}$ )，因此中频同步发电机设计时需要充分考虑发电机的超瞬变电流与  $x'_d$ 、瞬变电流与  $x''_d$  之间的关系；中频同步发电机设计参数与普通同步发电机相比  $x'_d$  取值要求偏大而  $x''_d$  取值偏小，具体值确定需要根据发电机容量、制造工艺、瞬变电压上升或下降的标准规定幅度以及恢复时间折中考虑，并通过仿真优化验证参数；同时也需要根据实际装备制造的情况对励磁控制算法加以改进，以提高励磁机电压的响应时间，降低发电机励磁回路时间常数所造成的延时效果。

### 3 中频无刷励磁系统的实现

所研究的中频无刷励磁系统电路拓扑结构如图2所示，其中励磁机为同步发电机，定子为静止的励磁磁场绕组，转子为电枢绕组，且与三相全桥整流器、中频同步发电机转子一起旋转；励磁机的定子磁场绕组并联了一个非线性电阻  $R$  以对磁场绕组和励磁调压电路中的功率器件起保护作用，在正常情况下其电阻非常大限至电流流通，当磁场绕组出现反方向的电流产生高压超过其阈值时，其阻值突然降低而导通电流。

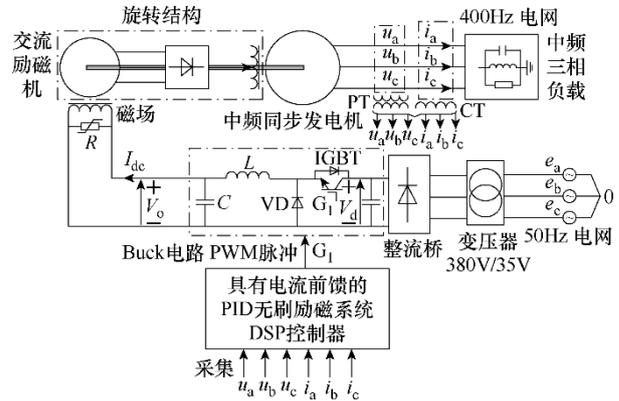


图2 中频同步发电机无刷励磁控制系统电路拓扑图

Fig.2 Mid-frequency synchronous generator's brushless excitation system with control topology

励磁机的磁场绕组电流由 Buck 调压电路输出的直流电压  $V_o$  提供。Buck 调压电路中直流输入电压  $V_d$  取自于 50Hz 三相变压器（线电压电压比为 380V/35V）并经三相全桥整流得到，其值为 47.25V（线电压有效值的 1.35 倍）。直流输入电压取自 50Hz 的电网的好处是可避免中频电网电压扰动而造成直流电压不稳定的影响。无刷励磁控制系统需要应用三个 LEM 电压传感器采集中频同步发电机机端输出的三相电压（ $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ ）以及 LEM 电流传感器采集的三相电流（ $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ ）信号以对中频供电系统输出电压进行快速精确的闭环控制。其控制方式是应用本文提出的励磁控制算法调节 IGBT 的占空比  $D$  对输出电压  $V_o$  进行调节，在负载突加或突卸的情况下，电流幅值变化较大，通过引入电流前馈环节增加了励磁系统对小信号响应带宽的能力，使其对励磁机的静止磁场绕组电流具有直接快速的调节能力，然后通过励磁机的三相旋转电枢绕组发出的电压并经三相桥式整流器整流间接对中频同步发电机的转子磁场电流进行控制。其中  $V_o$  的计算式为<sup>[7-8]</sup>

$$V_o = DV_d \quad (2)$$

### 4 具有电流前馈的 PID 励磁控制算法

励磁系统的 PID 控制算法因其具有较好的稳定性、可靠性以及工程实用性，在舰船用独立电力系统中应用较广泛，但是对于精密品质的中频 400Hz 的供电系统必须具有瞬变电压恢复时间不超过 0.1s 且发电机已经制造参数不能改变的情况下，

仅靠传统的 PID 控制算法往往难以满足要求 [9]。为解决因为中频发电机励磁回路时间常数存在一定延时致使中频供电系统瞬变电压恢复时间难以满足用户要求的问题, 本文提出具有电流前馈的 PID 励磁控制算法, 应用 Clark3/2 坐标变换快速计算线电压、相电流的有效值, 在对中频同步发电机机端输出电压进行 PID 闭环控制的基础上, 引入发电系统输出电流前馈环, 以提高励磁机输出电压响应的时效性, 满足中频供电系统在各级突加或突卸负载的情况下瞬变电压恢复时间的要求, 并使电压具有良好的动稳态响应。其基本算法是首先在 DSP 控制器中设置中频同步发电机输出线电压有效值 390V, 采用式 (3)、式 (4) 将通过 PT 传感器采集的三相电压瞬时值  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  以及 CT 传感器采集的三相电流瞬时值  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  变换到  $\alpha$ - $\beta$  坐标系

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (4)$$

根据式 (3)、式 (4) 求得的矢量电压成分  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$  以及矢量电流成分  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ , 依下式分别求得中频供电系统线电压的有效值  $U_{rms}$  及相电流的有效值  $I_{rms}$  分别为

$$U_{rms} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \quad (5)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{i_\alpha^2 + i_\beta^2}{3}} \quad (6)$$

依据上式求得线电压有效值  $U_{rms}$  以及相电流的有效值  $I_{rms}$  实时性较强, 但是实际测量的电压、电流成份中含有一定量的谐波, 需要对实测的  $U_{rms}$ 、 $I_{rms}$  在一个载波周期内采集的数据进行滤波以取得良好的控制效果, 然后通过 PID 控制算法和电流前馈环获得 Buck 电路中 IGBT 功率管器件的调制函数  $M$  为

$$M = \text{PID}(U_{ref} - U_{rms}) + f\left(\frac{I_{rms}}{I_{base}}\right) \quad (7)$$

式中,  $I_{base}$  为系统输出相电流的额定幅值;  $f(x)=Kx$ ,  $K$  值为小于 1 的系数。

通过仿真和实验得到不同负载情况下优化的

$K$  值, 并列表供程序调用。  $M$  值限幅在 0~1 之间变化, 通过与 DSP 芯片中的 PWM 模块提供的对称三角载波相比较的方法, 输出一路 PWM 脉冲系列, 经过外围接口电路触发 IGBT 功率管工作, 以控制 Buck 电路的输出电压  $V_o$ , 实现对励磁机的磁场电流进行快速调节。图 3 显示了具有电流前馈的 PID 励磁控制算法原理, 图中  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 、 $K_c$  分别为比例、积分、微分以及积分饱和纠正系数。根据图中的算法原理可知, 当中频供电系统突加负载时, 同步发电机输出电流突增, 通过电流前馈环可立即增加 Buck 电路中 IGBT 功率管的占空比  $D$ , 增加磁场输出电流, 间接地起到了缩小励磁回路时间常数的效果, 使系统输出电压瞬变跌落后再最短的时间内恢复至稳态。反之, 当中频供电系统负载突卸引起负载电流突减时, 因为电流的前馈环的作用, 可立

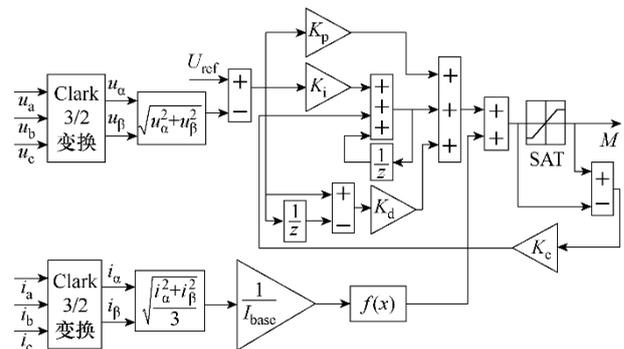


图 3 具有电流前馈的 PID 励磁控制算法  
Fig.3 PID with current feed-forward control algorithm for brushless excitation system

即减少 IGBT 功率管的占空比  $D$ , 减少磁场输出电流, 间接地起到了补偿励磁回路时间常数的效果, 使系统输出电压缓慢上升, 并在较短的时间内使系统恢复至稳态。增加电流前馈环节可使电压升(降)幅值缩小约 2%, 电压恢复时间缩短约 0.02s, 确保系统瞬态电压指标满足相关标准。

## 5 系统仿真与实验结果

系统仿真采用

Matlab/Simulink&Powersystem 软件进行建模仿真研究, 系统控制器采用 TI 公司的 DSP2407 芯片, 控制器主要功能如图 2 和图 3 所示, 程序采用 C 语言实现。中频同步发电机功率为 220kW, 线电压有效值为 390V, 频率为 400Hz, 极对数为 8, 转速由双馈调速电动机精确控制为 3000r/min。图 4 显示

了功率因数为 0.7 的情况下，中频负载在 9s 从 120kW 突加至 160kW 时的机端输出 A 相电压与电流的仿真波形，从图 4 中可知 A 相的最大电压降为 4.19%，电压恢复时间为 0.09s，THD 为 0.04%。图 5 显示了系统功率因数为 0.8，负载从

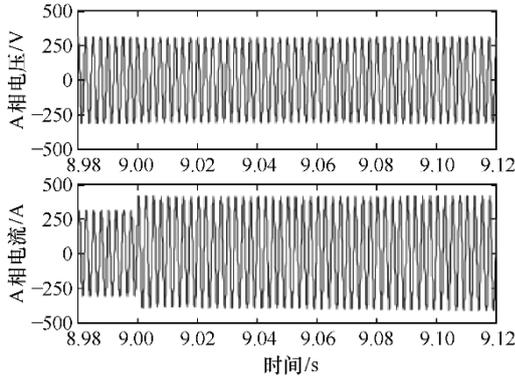


图 4 中频同步发电机输出相电压、相电流的仿真波形  
Fig.4 Simulation waveforms of the generator terminal voltage and output current

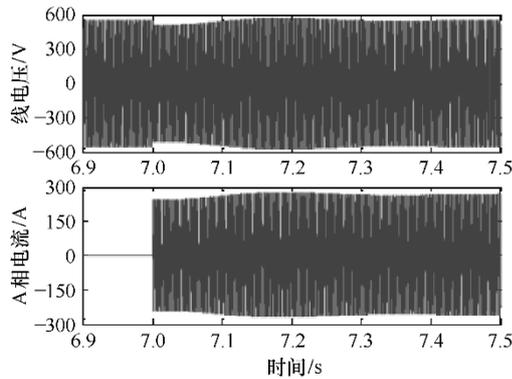


图 5 突加 50%负载时中频同步发电机输出线电压、相电流的仿真波形

Fig.5 Simulation results of the system line voltage and current when 50% load suddenly increased

0 突加至 50%的情况下线电压  $u_{ab}$ 、相电流  $i_a$  仿真波形，从图中可知线电压最大电压降为 7.8%，电压恢复时间小于 0.5s，瞬变电压调整特性符合标准规范<sup>[3]</sup>。

图 6 显示了系统在 0.9s 时负载从 120kW 突加至 160kW、11s 时负载从 160kW 突加至 200kW、13s 时负载从 200kW 突卸至 160kW 以及 15s 时负载从 160kW 突卸至 120kW 发电机机端输出线电压的包络线仿真波形，从图中计算可知线电压最大电压降低于 4.5%，电压恢复时间不超过 0.1s，电压瞬变以及稳态波形能够满足中频供电系统电能质量的要求，仿真结果表明了所设计中频无刷励磁控制系统具有良好的性能。图 7 显示了中频负载从 120kW 突加到 180kW 时系统输出线电压、相电流

实验波形以及励磁控制系统输出电压的 PWM 脉冲波形，系统最大电压降为额定值的 7%，电压恢复时间为 0.09s。图 8 显示了中频负载从 120kW 突卸至 60kW 时系统输出线电压、相电流的实验波形以及励磁控制系统输出电压的 PWM 脉冲波形，从图 8 中可知因为电流前馈环的作用使励磁机的电压响应得到了优化，系统最大电压升为额定值的 6.8%，电压恢复时间为 0.08s。图 9 对发电机输出电压的频谱进行了分析（负

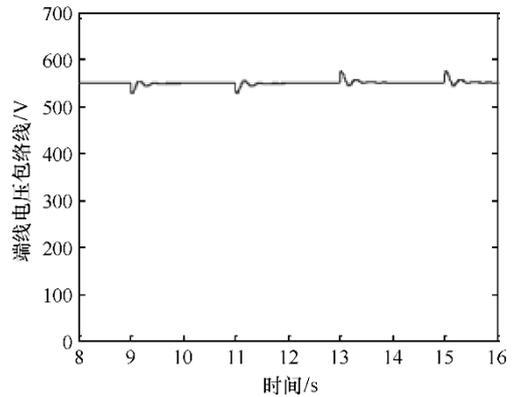


图 6 中频同步发电机机端线电压包络线的仿真波形  
Fig.6 Simulation result of the generator terminal line voltage envelope

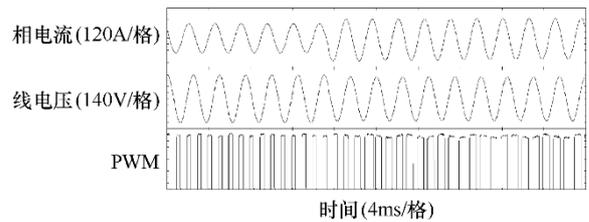


图 7 加载时系统输出电压、电流以及脉冲实验波形  
Fig.7 Experimental results of the 400Hz electrical system line voltage、current and pulse waveforms when load suddenly increased

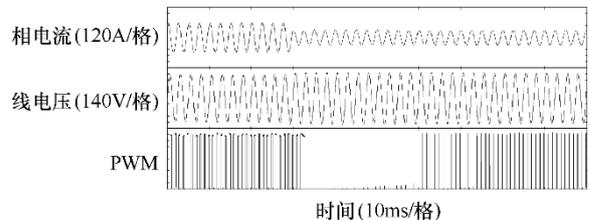


图 8 卸载时系统输出电压、电流以及脉冲实验波形  
Fig.8 Experimental results of the 400Hz electrical system line voltage、output current and pulse waveforms when load suddenly decreased

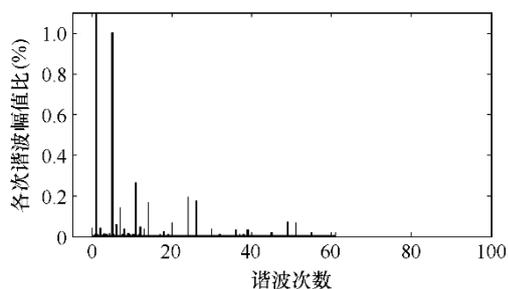


图 9 中频同步发电机机端稳态电压频谱分析

Fig.9 The 400Hz electrical system voltage spectrum

载为 120kW)，400Hz 时基波幅值为 550.6V，总的谐波畸变率（THD）为 1.10%，小于标准规定的 3%。实验结果表明所提出的励磁系统控制算法能够优化励磁机的电压响应，使系统电压指标符合中频供电系统设计要求。

## 6 结论

本文分析了中频供电系统瞬变电压的调整特性，提出了具有电流前馈的中频无刷励磁系统 PID 控制算法，该算法能够对无刷励磁同步发电机的励磁回路时间常数起到一定的补偿效果，优化了励磁机的电压响应，仿真分析以及实验结果验证了该方案的可靠性和有效性，能够较好地满足中频供电系统瞬变电压以及电压恢复时间的工程装备要求，系统具有良好的动稳态性能，输出电能质量高。

### 参考文献

- [1] 韩英铎, 谢小荣, 崔文进. 同步发电机励磁控制研究的现状与走向[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(4/5): 142-146.  
Han Yingduo, Xie Xiaorong, Cui Wenjin. Status quo

and future trend in research on synchronous generator excitation control[J]. Journal of Tsinghua Univ. (Sci & Tech), 2001, 41(4/5): 142-146.

- [2] 夏华凤, 程耕国. 无刷励磁同步电动机励磁系统智能控制[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 110-112.  
Xia Huafeng, Cheng Gengguo. Intelligent control of brushless excitation system for synchomotor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 110-112.
- [3] 章以刚. 舰船供电系统和装置[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.
- [4] Prabha Kundur. Power system stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [5] IEEE Std 421.5TM—2005. IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies[S]. New York: IEEE Power Engineering Society, 2005.
- [6] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [7] Mohan N, Undeland T M, William P R. Power electronics: converters, applications, and design[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- [8] 周明宝, 瞿文龙. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [9] 苏鹏声, 焦连伟. 自动控制原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

作者简介: 周德佳 男, 1970 年生, 博士, 主要从事舰船电力系统、励磁控制系统、电力电子装备控制研究。庄亚平 男, 1963 年生, 高级工程师, 主要从事舰船动力电力系统、系统工程、电机设计、大型电力电子装备控制研究等。