

# 发电机外部故障切除后励磁调节器调整特性分析

段俊东<sup>1</sup> 陈家林<sup>1,2</sup> 谢芸卉<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000; 2. 国网河南省电力公司安阳供电公司 安阳 455000)

**摘要:** 励磁调节器对改善发电机的调压特性起了积极作用,但对电流测量值引入后的分析不足。为了研究电流测量值对励磁调节器调整特性的影响,建立发电机自动励磁电压和固定励磁电压并网运行两种仿真模型,并利用戴维南等效电路对励磁调节器中的电流进行分析。仿真分析结果表明,励磁调节器在稳定机端电压的同时会加剧发电机与系统间的振荡,而引入的电流测量值是由发电机电势与系统电势相量差振荡产生呈低频振荡特性的交流电流,该电流会加剧发电机与系统间的振荡。最后通过进一步仿真验证了该理论分析的正确性。

**关键词:** 励磁调节器;调差特性;电流测量单元;戴维南等效;低频振荡

**中图分类号:** TM712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

## Analysis on adjustment characteristic of excitation regulator after external fault of generator

Duan Jundong<sup>1</sup> Chen Jialin<sup>1,2</sup> Xie Yunhui<sup>1</sup>

(1. Dept. of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Anyang Power Company, Henan Electric Power Company, State Grid Company of China, Anyang 455000, China)

**Abstract:** Excitation regulator plays a positive role in improving the voltage regulation characteristics of the generator, but the analysis of the current measurement is not enough. In order to study current measurement value of excitation regulator characteristics influence were established two simulation models of generator automatic excitation voltage and fixed excitation voltage, and the Thewenin's equivalent circuit of excitation regulation device in the current analysis. Analysis and simulation results show that the excitation regulator in the stable machine terminal voltage and intensified between the generator and the system oscillation, and the introduction of the current measurement value is by the generator voltage and system voltage vector difference oscillatory was characteristic of low frequency oscillation of the alternating current, the current will exacerbate the oscillation between the generator and the system. Finally, the correctness of theoretical analysis is verified by further simulation.

**Keywords:** excitation regulator; adjustment characteristic; current measurement unit; Thewenin's equivalent; low frequency oscillation

## 1 引言

随着电力工业的迅速发展,电网的结构和规模在不断扩大,电力系统的安全稳定运行受到了极大的挑战<sup>[1-3]</sup>。2003年8月14日的美加大停电和2006年7月1日的华中电网大停电都造成了重大的经济损失,分析这两次大规模的停电事故后发现,在停电过程中功率出现了大范围的振荡,造成电气元件在振荡过程中相继退出。因此低频振荡问题直接影响了电力系统的安全稳定运行,必须加以重视<sup>[4-6]</sup>。

一般认为低频振荡产生的机理是由于系统阻尼不足所

引起的,而现代高放大倍数的快速励磁系统是系统产生负阻尼的主要原因<sup>[7-9]</sup>。目前同步发电机的励磁控制系统一般采用自动电压调节器 AVR 和电力系统稳定器 PSS 的组合<sup>[10]</sup>。AVR 是利用对机端电压的负反馈来保证电压调节的精度;PSS 是通过在励磁系统中引入转速、频率等信号,增加系统阻尼来抑制系统振荡。文献[11]指出可将非线性励磁控制器的输出与 AVR 的输出选用并联接入方式;文献[12]在反馈线性化法设计的非线性励磁律中引入电压偏差信号,以改善电压调节精度;文献[13]改进了励磁系统的电压闭环控制,引入功角变化量作为偏差信号来修正偏差方程,但其阻尼系数与很多参数有关很难确定。这些研究

都没有考虑励磁调节器中的电流测量值对励磁调节器调整特性的影响。

本文首先对自动励磁调节系统中调差单元的作用进行了分析;然后在 MATLAB/Simulink 下分别建立发电机自动励磁电压和固定励磁电压并网运行仿真模型,对比分析励磁调节器的影响;进而利用戴维南等效电路对励磁调节器中的电流进行了特性分析;最后结合数字仿真进行了验证。

## 2 调差单元在励磁控制系统中的作用

### 2.1 调差系数的定义及其作用

在电力系统中,励磁调节器在维持发电机机端电压恒定的同时,还应兼顾发电机无功功率的合理分配,常常采用电压测量回路中叠加发电机无功电流的方法来改善励磁调

节器的调差特性,该特性常用调差系数来表示<sup>[14]</sup>。

调差系数定义为发电机功率因数等于零的情况下,发电机无功电流从零变化到额定发电机电流时,发电机电压的变化率。可用下式表示:

$$D\% = \frac{U_{G0} - U_{G1}}{U_{GN}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $U_{G0}$  为发电机的空载电压,  $U_{G1}$  为发电机无功电流为额定值时的端电压,  $U_{GN}$  为发电机的额定电压。

在实际运行中,发电机通常采用正调差系数,调差系数的大小一般控制在 3%~5%。

### 2.2 励磁系统中调差单元的引入方式

调差单元电流在自动调节励磁系统中的引入方式如图 1 所示。

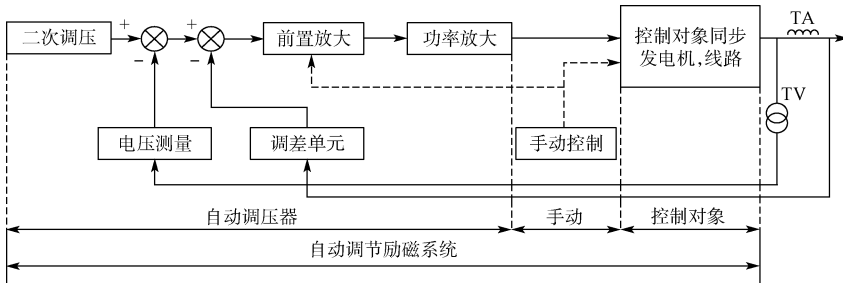


图1 自动励磁调节系统的原理

标准励磁系统模型中的发电机电压与电流测量回路的传递函数如图 2 所示。

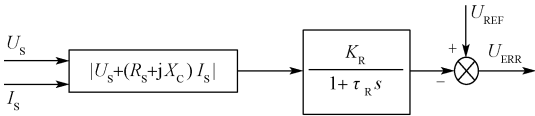


图2 电压信号测量与负载电流补偿模块

图 2 中,  $U_s$  为发电机定子电压相量,  $I_s$  为发电机定子电流相量,  $R_s$  为有功电流补偿系数,  $X_c$  为无功电流补偿系数,  $K_R$  为检测环节放大倍数,  $\tau_R$  为检测环节时间常数,  $U_{REF}$  为发电机电压给定值,  $U_{ERR}$  为电压偏差。

由图 1 和 2 可知,定子电流通过电流互感器并经过调差单元以阻抗压降的形式被引入到自动励磁调节系统中。当系统发生故障时,故障电流经过整流滤波环节后其低频分量被保留下来。该值的引入会对发电机的励磁控制系统产生一定的影响,不利于发电机和电力系统的稳定运行。

## 3 发电机自动励磁电压和固定励磁电压并网运行仿真分析

### 3.1 同步发电机与励磁系统的数学模型

同步发电机数学模型:

$$\begin{cases} T_J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_c - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{fd} - (x_d - x'_d)I_d - E'_q \\ T'_{d0} \frac{dE''_q}{dt} = -E'_q - (x'_d - x''_d)I_d + E'_q + T''_{d0} \frac{dE'_q}{dt} \\ T'_{q0} \frac{dE'_d}{dt} = -E'_d + (x_q - x'_q)I_q \\ T''_{q0} \frac{dE''_d}{dt} = -E'_d - (x'_q - x''_q)I_q + E'_d + T''_{q0} \frac{dE'_d}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $E'_d$ 、 $E''_d$ 、 $E'_q$  和  $E''_q$  为发电机  $d$  轴和  $q$  轴的暂态电势和次暂态电势,  $E_{fd}$  为励磁电压,  $x_d$ 、 $x'_d$ 、 $x''_d$ 、 $x_q$ 、 $x'_q$  和  $x''_q$  为发电机  $d$  轴和  $q$  轴的同步电抗、暂态电抗和次暂态电抗,  $T'_{d0}$ 、 $T''_{d0}$ 、 $T'_{q0}$  和  $T''_{q0}$  为发电机  $d$  轴和  $q$  轴的暂态时间常数和次暂态时间常数,  $T_J$  为发电机惯性常数;  $M_m$  和  $M_c$  为机械力矩和电磁力矩,  $\omega$  和  $\omega_0$  为发电机的角速度和同步转轴角速度,  $\delta$  为发电机的电势向量与同步转轴之间的夹角,  $D$  为阻尼系数。

自动励磁电压系统的数学模型如图 3 所示。

图 3 中,  $E_{ef}$  为励磁机出口电压,  $K$  为各检测环节的放大倍数,  $\tau$  为各检测环节的时间常数。

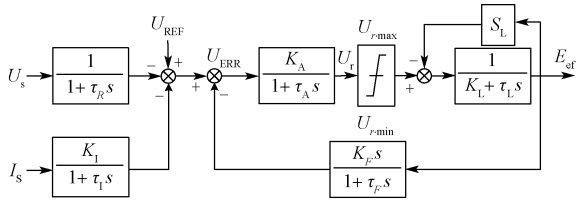


图 3 励磁系统数学模型

3.2 仿真模型的建立

为了分析发电机并网运行时励磁调节器的调整特性, 本文分别建立了发电机固定励磁电压仿真模型和自动励磁电压仿真模型。图 4 和 5 分别为发电机固定励磁电压和自动励磁电压并网运行的示意图。

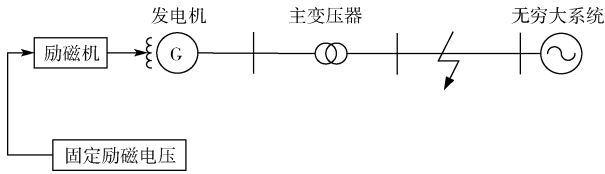


图 4 发电机固定励磁电压运行示意图

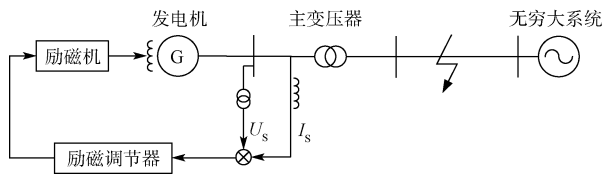


图 5 发电机自动励磁电压运行示意图

1) 发电机的参数

200 MVA、13.8 kV、60 Hz、 $x_d = 1.305$ 、 $x'_d = 0.296$ 、 $x''_d = 0.252$ 、 $x_q = 0.474$ 、 $x'_q = 0.243$ 、 $T'_d = 1.01$  s、 $T''_d = 0.053$  s、 $T''_{\varphi 0} = 0.1$  s、 $R_s = 0.002854$ 、 $H = 3.2$  s、 $F = 0$ 、 $p = 32$ , 其中各电阻电抗均为标幺值(p. u.);

2) 励磁系统的参数

$\tau_R = 0.02$  s、 $K_A = 300$ 、 $\tau_A = 0.001$  s、 $U_{rmax} = 11.5$  p. u.、 $U_{rmin} = -11.5$  p. u.、 $K_I = 0.16$ 、 $\tau_I = 0$  s、 $K_F = 0.001$ 、 $T_F = 0.1$  s、 $K_L = 1$ 、 $\tau_L = 0$  s;

3) 故障设置

故障类型分别设置单相接地短路、两相短路、两相接地短路和三相接地短路 4 种故障类型(由于故障类型对仿真结果影响不明显, 选取三相接地短路作典型说明)。故障时间为 0.1~0.2 s, 保证在第一摇摆周期不失稳;

4) 发电机故障前的稳定运行参数

故障发生前发电机处于稳定运行状态, 同时将发电机作为 PV 节点, 无穷大系统作为平衡节点并进行潮流计算后可得:  $I_a = 0.531$  p. u.、 $U_a = 0.707$  p. u.、 $\delta = 19.386^\circ$ 、 $U_f = 1.291$  p. u.。

3.3 仿真结果分析

图 6 为仿真结果, 表 1 为发电机故障切除后的主要运行参数。

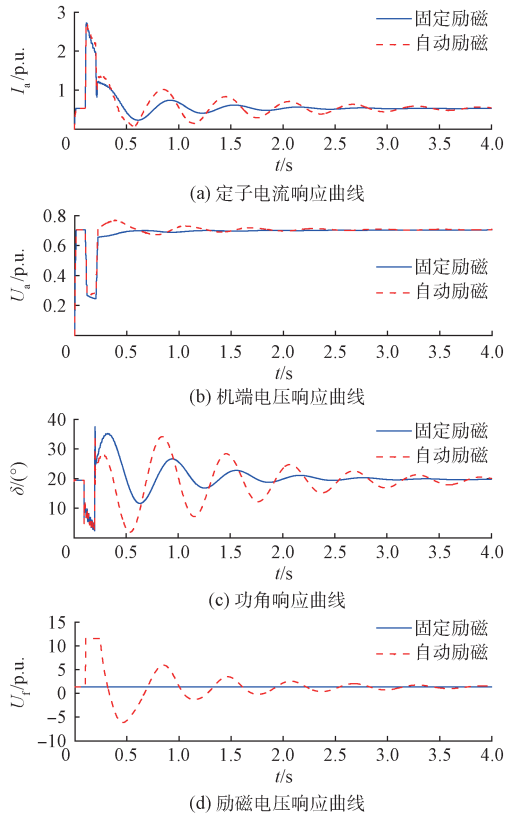


图 6 发电机固定励磁运行和自动励磁运行系统响应曲线

表 1 发电机固定励磁电压和自动励磁电压的运行状态

发电机运行状态	故障后第一摇摆周期峰谷差	相对稳定时间/s	
		摆周期	谷差
定子电流/p. u.	固定励磁	0.997	2.5
	自动励磁	1.306	3.8
机端电压/p. u.	固定励磁	0.015	0.8
	自动励磁	0.099	3.4
功角/(°)	固定励磁	23.684	3.3
	自动励磁	32.544	—
励磁电压/p. u.	固定励磁	—	—
	自动励磁	12.135	3.8

结合图 6 和表 1 可知, 当 0.2 s 故障切除后, 采用固定励磁电压方式运行的发电机, 其定子电流、机端电压、功角以及励磁电压的峰谷差和相对稳定时间, 均小于采用自动励磁电压方式运行的发电机。说明当故障切除后, 采用固定励磁电压方式运行的发电机更利于系统稳定。

然而, 从图 6(b) 可知, 采用固定励磁电压方式运行的

发电机,当故障切除后,发电机的端电压要小于故障前发电机的端电压,造成这种情况的主要原因是因为在固定励磁电压下励磁系统无法通过强励作用来提升发电机的端电压,这样便无法保证良好的电压质量。因此,为了保证良好的电压质量,往往会采用加装自动励磁调节器的发电机。

#### 4 基于戴维南定理的电流测量值对励磁调节器特性影响分析

图7为发电机并网时的戴维南等效电路,图8为其电流、电压关系相量图。

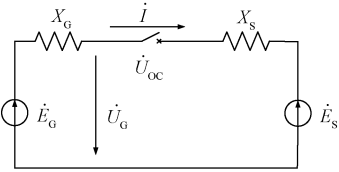


图7 戴维南等效电路

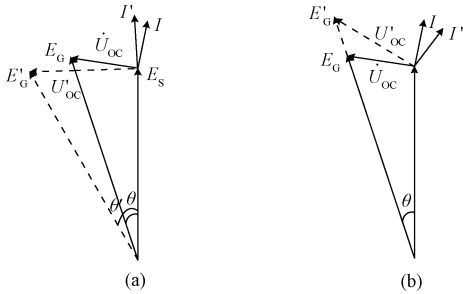


图8 相量关系

在图7和8中, $\dot{E}_G$ 为发电机电动势相量, $\dot{E}_S$ 为系统电动势相量, $\dot{U}_G$ 为发电机端电压, $\dot{U}_{OC}$ 为开路等效电压, $X_G$ 为发电机内部等效电抗, $X_S$ 为系统等效电抗,回路等效电流 $\dot{I}$ 即为发电机励磁调节系统调差单元的测量电流。

开路等效电压为:

$$\dot{U}_{OC} = \dot{E}_G - \dot{E}_S \quad (3)$$

回路等效电流为:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_G - \dot{E}_S}{j(X_G + X_S)} \quad (4)$$

当 $\dot{E}_G$ 与 $\dot{E}_S$ 同步时,其两者间夹角 $\theta$ 固定;当 $\dot{E}_G$ 与 $\dot{E}_S$ 不同步时, $\dot{U}_{OC}$ 随 $\theta$ 角变化而变化。其相角差函数为:

$$\theta(t) = 2\pi(f_G - f_S)t + \theta_0 = \omega_s t + \theta_0 \quad (5)$$

式中: $f_G$ 为发电机频率, $f_S$ 为系统频率, $\theta_0$ 为发电机与系统的初相差, $\omega_s$ 即为转差角频率。

发电机端电压为:

$$\dot{U}_G = \dot{E}_G - j\dot{I}X_G \quad (6)$$

$$\text{或 } \dot{U}_G = \dot{E}_S + j\dot{I}X_S \quad (7)$$

由式(3)、(4)可知,由于 $j(X_G + X_S)$ 可认为恒定不变,故电流 $\dot{I}$ 的幅值随 $\dot{U}_{OC}$ 幅值振荡变化。

由图8(a)可见, $\dot{U}_{OC}$ 幅值随 $\theta$ 角振荡变化,故电流 $\dot{I}$ 的

幅值主要与 $\dot{E}_G$ 和 $\dot{E}_S$ 之间的夹角 $\theta$ 有关。

由式(6)可知,电流 $\dot{I}$ 的幅值振荡变化会引起发电机端电压 $\dot{U}_G$ 的幅值振荡变化,励磁调节器调整时,当相角差最大时,电压调整量也就最大,则会造成开路电压达到最大,此时回路电流也达到最大。

由式(7)可知,当系统等效电抗 $X_S$ 较大时,发电机端电压 $\dot{U}_G$ 的波动较大,因此励磁调节器的调整作用比较强,在一定程度上会加强 $\dot{E}_G$ 的变化,造成电流 $\dot{I}$ 的幅值振荡加强,如图8(b)所示。

综上所述,当发电机与系统产生振荡时,其回路电流是一个幅值振荡的交流电流,近似值为开路电压与回路电抗之比,其振荡特性与功角振荡特性相同,该值引入励磁调节器后会加剧发电机与系统间的振荡。

#### 5 仿真实验

为了验证当发电机与系统产生振荡时,引入励磁调节器中的电流会加剧发电机与系统间的振荡这一结论。仿真所采用的发电机和励磁系统的参数,发电机故障前的运行状态,故障类型等与3.2节相同。仅不考虑励磁调节中的电流测量值(补偿电流)。通过建立无补偿电流励磁调节器的发电机并网运行仿真模型,与含无功补偿电流的发电机进行对比分析。图9为无补偿电流的发电机并网运行示意图,如图10为仿真结果,表2为发电机故障切除后的主要运行参数。

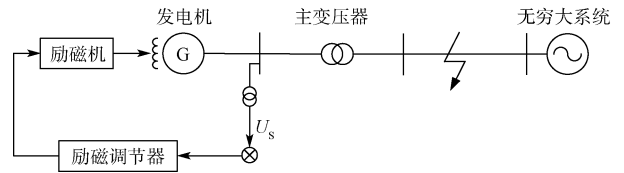
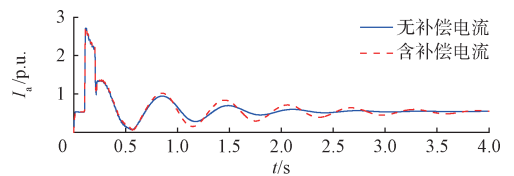
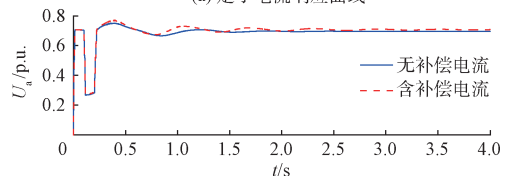


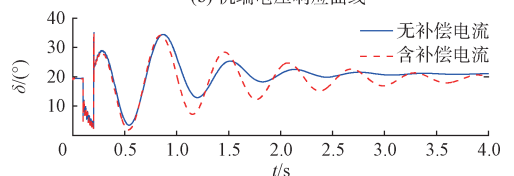
图9 无补偿电流的发电机并网运行示意图



(a) 定子电流响应曲线



(b) 机端电压响应曲线



(c) 功角响应曲线

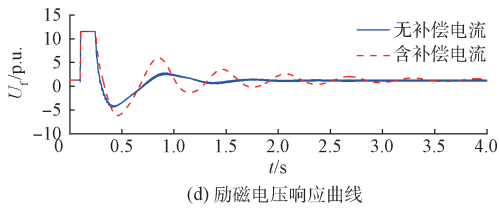


图 10 发电机无补偿电流和含补偿电流的系统响应曲线

表 2 发电机无补偿电流和含补偿电流的运行状态

发电机运行状态		故障后第一摇摆周期峰谷差	相对稳定时间/s
定子电流/p. u.	无补偿电流	1.293	2.5
	含补偿电流	1.306	3.8
机端电压/p. u.	无补偿电流	0.086	1.8
	含补偿电流	0.099	3.4
功角(°)	无补偿电流	30.594	3.3
	含补偿电流	32.544	—
励磁电压/p. u.	无补偿电流	7.157	2.1
	含补偿电流	12.135	3.8

结合图 10 和表 2 可知,在发电机的运行工况以及各参数相同的情况下,当 0.2 s 故障切除后,采用无补偿电流励磁调节器并网运行的发电机,其定子电流、机端电压、功角以及励磁电压的峰谷差和相对稳定时间,均小于采用采用含补偿电流励磁调节器并网运行的发电机。说明当发电机与系统发生振荡时,电流测量单元中的电流被引入到励磁调节器后会在一定程度上加剧发电机与系统间的振荡。

## 6 结 论

1)通过仿真结果表明,当发电机并网运行故障切除后,励磁调节器在维持机端电压相对稳定的同时会加剧发电机与系统间的振荡。

2)利用戴维南定理进行理论分析可知,当发电机与系统产生振荡时,引入励磁调节器中的电流为幅值振荡的交流电流,近似为开路电压与回路电抗之比,其振荡特性与功角振荡特性相同。该值的引入会加剧发电机与系统间的振荡。

3)在发电机运行工况以及各参数相同的情况下,通过比较无补偿电流励磁调节器的发电机和含补偿电流励磁调节器的发电机,说明引入励磁调节器中的电流会在一定程度上加剧发电机与系统间的振荡。

## 参 考 文 献

[1] 林智勇,蔡金锭. 变压器等效电路参数变化对极化谱的影响分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,

28(3): 292-298.

- [2] 艾永乐,都静静,王玉栋,等. 基于改进的稳态法获取三相系统谐波阻抗[J]. 电子测量技术, 2015, 38(12): 15-19.
- [3] 魏学良,程婷. 谐波治理设备在供电系统中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(3): 73-76.
- [4] 王茂海,郭登峰,江长明. 低频振荡过程中励磁系统阻尼特性分析方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 47-68.
- [5] 易建波,黄琦,丁理杰,等. 结合 WAMS 的低频振荡模式信息在线检测算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 177-185.
- [6] 赵红生,刘源,陈伟彪,等. 互联电力系统联络线功率波动机理及其扰动概率分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 1-9.
- [7] 梁志飞,肖鸣,张昆,等. 南方电网低频振荡控制策略探讨[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 54-58.
- [8] 李啸懿,郑涛,梁志坚,等. 微分代数模型可控制电阻与励磁系统多指标非线性控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 1-7.
- [9] 王明星,穆钢,安军,等. 电力系统多时段多目标的发电机励磁系统调差系数优化整定[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3178-3183.
- [10] 阮阳,袁荣湘. 采用输出反馈方式的电力系统非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 68-76.
- [11] 吴跨宇,竺士章. 发电机励磁系统调差对 PSS 参数整定的影响与对策[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 67-71.
- [12] 赵平,姚伟,王少荣,等. 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.
- [13] 霍成祥,刘取,濮钧. 励磁系统中附加调差对电力系统振荡模式阻尼的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 65-70.
- [14] 金娜,刘文颖,曹银利,等. 大容量机组一次调频参数对电网频率特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 91-100.

## 作者简介

段俊东,1969 年出生,博士,副教授,硕士研究生导师,主要研究领域为电力系统稳定、煤矿供电系统与配电网分析、中低压防雷等。

陈家林(通讯作者),1990 年出生,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制。

E-mail:ceven.chen@163.com

谢芸卉,1992 年出生,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制。