

一种基于基波磁通调谐补偿的无源滤波新方法

陈群, 焦留成

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对有源滤波器初期投资大、电流实时检测的缺点, 提出了一种无源滤波新方法, 即在每相中增加一基波单绕组变压器, 其一次侧串联在电源和无源滤波器之间, 二次侧通过与基波调谐 LC 滤波器串联, 在满足基波磁通补偿的条件下使基波电流顺利通过变压器, 而谐波电流被迫流入单调谐滤波器中, 从而提高无源滤波器的效率。利用 Matlab 对所建模型进行仿真, 仿真结果表明在本设计的低功率整流设备中, 本方案能有效滤除电力系统谐波。

关键词: 基波磁通补偿; 无源; 变压器; 谐波; 滤波

A new passive filtering method based on fundamental magnetic flux tuned compensation

CHEN Qun, JIAO Liu-cheng

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Due to the shortcomings of APF with big initial investment and real-time detection, a new passive filtering is proposed, i.e. to add a simplex winding transformer at each phase, in which primary side connects in series between the source and PF and secondary side in series with LC tuned filter. Under the satisfaction of fundamental magnetic flux compensation, it will make the fundamental wave sweep through the transformer, and force the harmonic current pour into the single-tuned filter, which can increase the efficiency of PF. By means of Matlab, the model is constructed and analyzed, the simulation result shows that this design can filter power system harmonic effectively in the proposed lower power rectifying device.

Key words: fundamental magnetic flux compensation; passive; transformer; harmonic; filtering

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)09-0027-04

0 引言

随着电力电子技术的迅速发展,特别是在冶金、矿山、电气化铁道、电力输送等工业系统中大量采用硅整流设备和换流逆变设备,这些非线性负荷在系统中产生大量谐波,从而恶化了电能质量并直接导致经济损失,引起了人们对电力系统谐波治理问题的不断重视,因而也应运而生了各式各样的滤波装置,而有源滤波器也正因为其良好的动态补偿特性备受关注^[1],其中主要包括基于基波磁通补偿原理的有源滤波器和基于瞬时无功功率的有源滤波器这两类^[2],前者通过采用电压型 PWM 逆变器来跟踪检测到的基波补偿电流在满足基波磁通补偿原理的条件下通过变压器二次侧注入基波补偿电流,以此提高无源滤波器的滤波效率。而后者采用瞬时无功功率理论实时检测到补偿谐波电流,通过控制逆变器产生一个与谐波电流相反的电流来抵消负载中所包含的谐波,使系统电流变成正弦波。但是这两

种方案在具体应用中仍有一些困难:采用有源滤波器时,其初始投资都很高,同时要实现具有快速电流响应的逆变器也很难,而且目前能实现的容量较小,因此实际工程应用中大多数仍采用技术较为成熟的无源滤波器。而在波形畸变比较严重的情况下仅使用无源滤波器无法满足国家标准要求^[3-4],本设计结合以上情况提出了一种基于变压器二次侧基波磁通调谐补偿和无源滤波器同时作用的方法来抑制谐波,仿真结果表明本设计具有较好的滤波特性。

1 基本原理和系统的仿真图

1.1 基本原理

如图1所示,变压器一次侧绕组串联于谐波源与电源之间,二次侧绕组与 L_1C_1 基波谐振回路串联,由于其谐振频率为基波频率,即对于基波而言,变压器一次侧对基波呈现很小以致可以忽略的一次侧漏抗,而对谐波呈现一次侧很大的励磁阻抗,则基波电流可以顺利通过T。而对于谐波电流而言,变

压器二次侧相当于开路, 则谐波电流的大部分被阻止通过变压器, 从而使大部分谐波电流被迫流入无源滤波器, 起到了谐波隔离的作用, 提高了滤波器的效率^[5]。

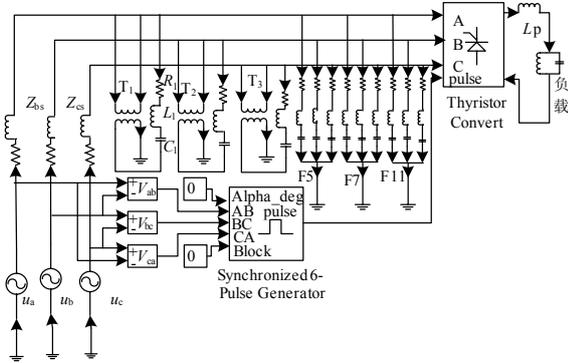


图 1 系统仿真图

Fig.1 Simulation diagram of the system

1.2 系统仿真图

图 1 为系统仿真结构图。 u_a 、 u_b 、 u_c 为 380 V 系统电压, Z_{as} 、 Z_{bs} 、 Z_{cs} 为系统阻抗, T_1 、 T_2 、 T_3 为三个独立的单绕组变压器, 其一次侧串联在电源和谐波源之间, 其二次侧均与一个 LC 基波串联谐振电路串连。本设计谐波源为六脉波可控整流器, 其谐波主要包括 5、7、11 ($6K \pm 1$, $K=1, 2, 3$) 等次谐波, 因此本设计只设立了采用星型接法的 5 次、7 次和 11 次 RLC 单调谐滤波支路。谐波源三相六脉波可控整流器采用双脉冲相控方式, 仿真时可通过更换控制角, 观察角度变化时的滤波效果^[6]。

2 系统参数设计与 Matlab 仿真

根据基波磁通补偿新原理^[1], 当满足基波磁通补偿条件时, 变压器一次侧对基波呈现很小可以忽略的一次侧漏抗, 而对谐波呈现一次侧励磁阻抗。设计串联变压器变比 $k = W_1 : W_2 = 1 : 1$, 基波励磁阻抗为 Z_{m1} , 则对 n 次谐波的阻抗为 nZ_{m1} 。为了使系统得到较好的滤波效果, 变压器的励磁阻抗不能太小。在本设计 380 V 的三相系统中, 设计变压器参数时应尽量使漏阻抗远小于励磁阻抗, 则对基波, 若励磁阻抗 Z_{m1} 和漏阻抗的比值为 M , 则 n 次谐波励磁阻抗 nZ_{m1} 与基波的漏阻抗比值为 Mn 。由此本设计变压器励磁阻抗 $R_m = 25$ (pu), $L_m = 25$ (pu), 绕组 1 和绕组 2 的阻抗为 $R_{1,2} = 0.03$ (pu), $L_{1,2} = 0.001$ (pu), 它们之间的比值 ≥ 1000 , 则 n 次谐波励磁阻抗 nZ_{m1} 与基波漏阻抗的比值将超过 $1000n$, 这样就提高系统对谐波的阻抗, 从而迫使谐波电流更多地流入无源滤波器支路。

考虑到本设计的谐波源功率因数较高, 无需补

充无功, 故单调谐滤波器中的电容可设计得小一些, 取 $C_5 = 170 \mu\text{F}$, $C_7 = 80 \mu\text{F}$, $C_{11} = 40 \mu\text{F}$, 按照单调谐滤波器的设计原则^[7] $X_L = X_C / h_n^2$ (h_n 代表第 n 次谐波), 可以计算出各单调谐电路电感值 $L_5 = 2.3864 \text{ mH}$, $L_7 = 2.5873 \text{ mH}$, $L_{11} = 2.0955 \text{ mH}$, 取单调谐滤波器的品质因数为 $Q = 60$, 则各单调谐的电阻 $R_5 = 0.0624 \Omega$, $R_7 = 0.0948 \Omega$, $R_{11} = 0.1206 \Omega$ 。取变压器二次侧的基波调谐电路参数 $L_1 = 3 \text{ mH}$, $C_1 = 0.0034 \text{ F}$ 。变压器 $P_n = 1000 \text{ VA}$, $V_1 = V_2 = 380 \text{ V}$ 。

利用 Matlab 对系统进行仿真, 并利用其中 POWERGUI 记录电流波形同时对波形进行 FFT 谐波分析。

图 2、图 3、图 4 分别为 $\alpha = 0^\circ$ 时一次侧不加任何滤波器、只加无源滤波器和同时加无源滤波器和变压器基波磁通补偿的电流波形和谐波分析图 (以 A 相电流为例)。图 5 为示波器记录三种情况下电流波形比较图和系统电压波形。

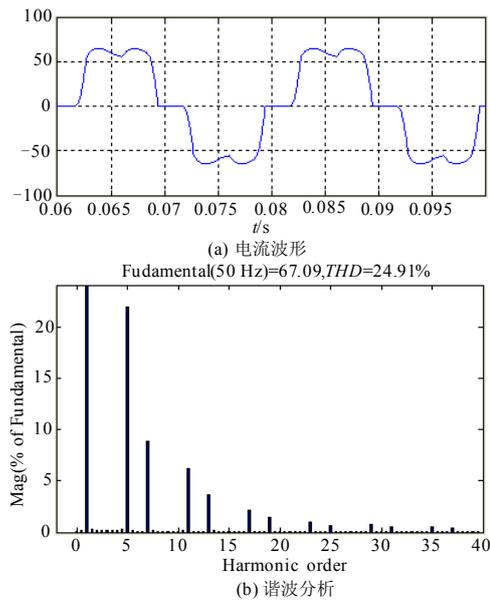
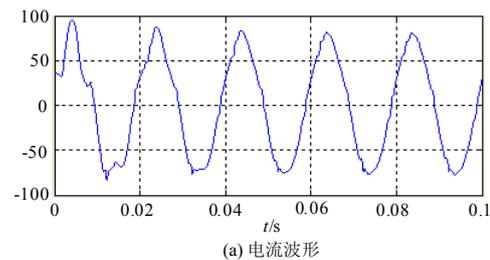


图 2 不加任何滤波装置时一次侧电流波形及其谐波分析 results when no filter is added



(a) 电流波形

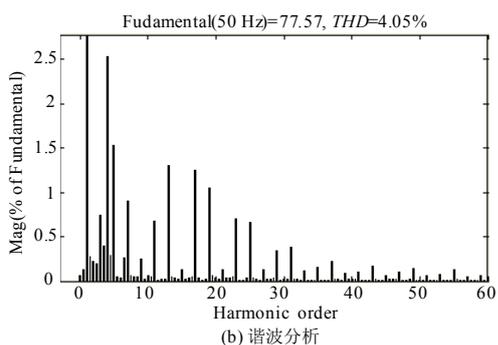


图3 只加无源滤波器时一次侧电流波形及其谐波分析
Fig.3 Source current waveform and their harmonic analysis results when passive filter is added only

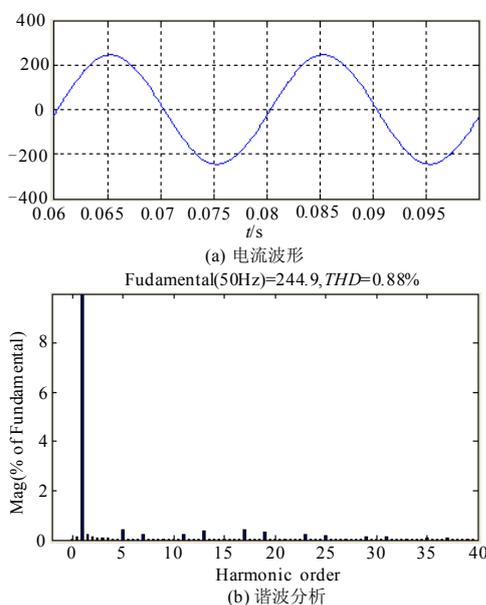


图4 同时加无源滤波器和变压器基波磁通补偿时的变压器一次侧电流波形及谐波分析
Fig.4 Source current waveform and their harmonic analysis results when the passive and fundamental magnetic flux compensation are simultaneously used

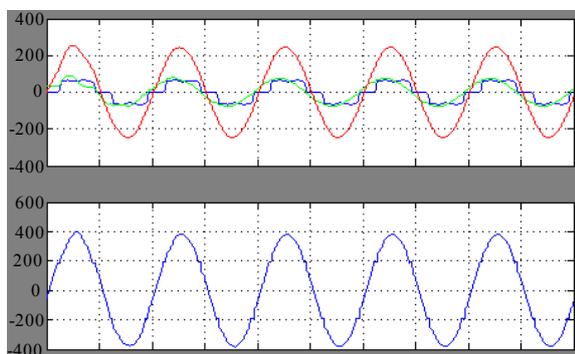


图5 三种情况电流波形比较图(上)和电压源波形(下)
Fig.5 Comparison of current waveform under three circumstances (up) and the voltage waveform (down)

利用 Matlab 中 POWERGUI 的 FFT 函数对三种情况波形进行分析结果如表 1 所示。从表 1 可知, 三种情况下的电流畸变率 (THDI) 分别为 24.91%, 4.05%, 0.88%, 而基于三相基波磁通有源滤波器补偿后变压器一次侧电流 $THD=1.5\%$ ^[6], 基于瞬时无功理论的有源滤波器补偿后的系统电流 $THD=0.82\%$ ^[8]。本方案补偿后的电流波形基本上与系统电压波形近似(如图 5 所示)。相比而言, 本方案也能达到有源滤波方法所达到的效果。

表 1 3 种情况下各主要谐波成分的百分比

Tab.1 Main harmonic content percent ratio in three cases

基波及谐波次数	不加任何滤波器	只加无源滤波器	同时加无源和基波磁通调谐补偿
基波	100.00	100.00	100.00
2	0.16	0.22	0.13
3	0.12	0.73	0.07
4	0.16	2.53	0.03
5	21.94	1.52	0.40
6	0.04	0.03	0.03
7	8.85	0.91	0.23
8	0.11	0.04	0.03
9	0.08	0.25	0.03
10	0.11	0.06	0.02
11	6.16	0.67	0.22
12	0.01	0.02	0.02
13	3.64	1.3	0.37
14	0.07	0.03	0.01
15	0.05	0.13	0.01
16	0.06	0.03	0.02
17	2.16	1.24	0.39
18	0.01	0.01	0.01
19	1.48	1.05	0.30

为了证明基波补偿原理的正确性, 记录了变压器一次、二次侧的电流波形和谐波分析结果。由图 6 可看出, 变压器一次、二次基波电流幅值、波形基本保持一致, 方向相反, 由表 2 中 5、7、9 等主要谐波含量很小, 说明对谐波来说, 变压器确实起到了谐波隔离的作用, 而对基波几乎零阻抗通过。

考察本设计对谐波畸变较严重时的滤波效果, 改变相控角为 $\alpha=30^\circ$, 三种情况下电流畸变率分别为 32.36%、7.03%、1.13%, 补偿后系统电流波形近似正弦波。当 $\alpha=60^\circ$ 时, 电流畸变率分别为 45.58%、14.52%、1.05%。这样在直流侧需要输出的整流电压较小情况下, 系统的电流波形畸变非常严重(如图 7 所示), 将进一步导致系统电压波形畸变严重,

从而超出国家谐波标准的要求，这样仅使用无源滤波器将无法达到要求。由此可见，本设计对畸变严重的电流波形仍具有较好的滤波效果。

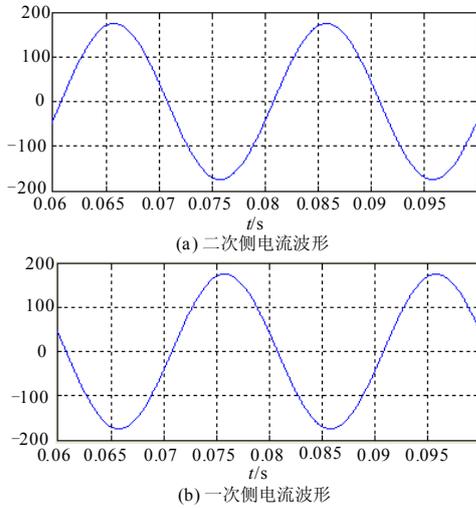


图 6 变压器一次、二次电流波形

Fig.6 Primary and secondary side current of transformer

表 2 变压器一次、二次侧电流波形基波幅值以及谐波百分比
Tab.2 Current, fundamental amplitude and harmonic content percent ratio of primary side and secondary side

n TI	基波幅值	基波	5次	7次	11次	13次	17次	19次
一次侧	174.6	100	0.22	0.14	0.09	0.14	0.17	0.12
二次侧	174.8	100	0.22	0.14	0.09	0.14	0.17	0.12

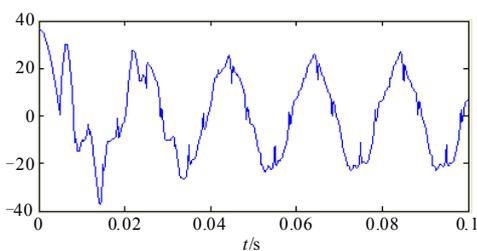


图 7 $\alpha=60^\circ$ 只加无源滤波器时系统电流波形

Fig.7 System current waveform when passive filter is added only

3 结论

本文结合基于磁通补偿的新原理提出一种滤波新方法，鉴于利用基波磁通补偿的有源滤波器进行补偿时，基波电流大，相应的电力电子逆变器容量也较大，因而造价高，且会增加控制和运行的复杂

性；而以谐波为检测对象时，采用瞬时无功功率理论的复杂性和检测的实时性也难以克服。而本设计采用三个独立的串联变压器进行基波调谐补偿，省去了信号处理的难度，容易实现。

本文通过 Matlab 建立仿真模型，利用 POWERGUI 对波形进行分析。仿真结果表明本设计在解决供电系统谐波污染方面具有较好的综合效果。与有源滤波器相比，具有简单易实现的优点。

参考文献

- [1] 李达义, 陈乔夫, 贾正春. 一种实用的基于基波磁通补偿的串联混合型有源电力滤波器[J]. 电工技术学报, 2003, 18 (1): 67-71.
LI Da-yi, CHEN Qiao-fu, JIA Zheng-chun. A Practical Series Hybrid Active Power Filter Based on Fundamental Magnetic Flux Compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18 (1): 67-71.
- [2] 姚为正, 王群, 刘进军, 等. 基于瞬时无功功率理论的谐波电压瞬时检测方法[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32 (12): 8-11.
YAO Wei-zheng, WANG Qun, LIU Jin-jun, et al. Harmonic Voltage Instant Test Method Based on the Instantaneous Reactive Power Theory[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32 (12): 8-11.
- [3] Moran L A, Dixon J W, Wallace R R. A Three Phase Active Power Filter Operating with Fixed Switching Frequency for Reactive Power and Current Harmonic Compensation[J]. IEEE Trans on Ind Elec, 1995, 42 (4): 402-408.
- [4] 林海雪. 电能质量国家标准讲座(3) 公用电网谐波标准[J]. 电工课堂, 2006(4).
LIN Hai-xue. Power Quality Lectures of National Standards(3) Harmonic Standard of Public Utility Grid[J]. Electrician Classroom, 2006(4).
- [5] 钟丹, 任士焱, 杨华云. 基于基波与谐波同时作用原理的谐波抑制装置[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(S1):410-411.
ZHONG Dan, REN Shi-yan, YANG Hua-yun. Harmonic Suppression Device Based on Theory of Fundamental and Harmonic Waves Applied Simultaneously[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(S1):410-411.
- [6] 李达义, 陈乔夫, 薛建科, 等. 基于基波磁通补偿的三相有源电力滤波器[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(11): 51-55.
LI Da-yi, CHEN Qiao-fu, XUE Jian-ke, et al. Three Phase Active Power Filter Based on Fundamental Magnetic Flux Compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (11) : 51-55.
- [7] Wakileh G J. 电力系统谐波基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2003.

(下转第 99 页 continued on page 99)

3 结论

将 IEC61850 标准中的 GOOSE 模型应用于变电站监控系统的防误闭锁, 可以快速而可靠的进行闭锁信息的传输, 杜绝误闭锁情况的发生, 同时也简化了监控系统的设计方案, 节省了设备投资, 是一种较为完善而可靠的防误闭锁实施方案, 值得在国内变电站中推广应用。

参考文献

- [1] 徐德超, 马春雷. 变电站防误操作技术措施应用研究[J]. 贵州电力技术, 2005, 25 (9): 26-27.
- [2] 顾拥军, 皮卫华, 杨乘胜, 等. 变电站防误闭锁应用分析[J]. 继电器, 2005, 33 (2): 66-70.
GU Yong-jun, PI Wei-hua, YANG Cheng-sheng, et al. Application Analysis of Anti-mistake Defense System in Substation[J]. Relay, 2005, 33 (2): 66-70.
- [3] 陈志军, 李剑刚, 高宏伟. 500 kV 综合自动化变电站的防误闭锁应用[J]. 继电器, 2006, 34 (18): 69-71.
CHEN Zhi-jun, LI Jian-gang, GAO Hong-wei. Application of Mistake Proof and Lock Installation in 500 kV Comprehensive Automatic Substation[J]. Relay, 2006, 34 (18): 69-71.
- [4] 冯锋, 冯华. 综合自动化变电所微机防误功能的分析[J]. 自动化仪表, 2004, 25 (5): 76-78.
FENG Feng, FENG Hua. Analysis on Anti-malfunction of Microcomputer in Comprehensive Automation Substation[J]. Automation Instrumentation, 2004, 25 (5): 76-78.
- [5] 侯正纲. 计算机监控发电厂、变电站电气防误操作问题探讨[J]. 四川水利发电, 2006, 25 (3): 133-135.
HOU Zheng-gang. Discussion on Mistake Proof in Power Plant and Substation Based on Computer Supervision[J]. Sichuan Water Power, 2006, 25 (3): 133-135.
- [6] 高翔. 数字化变电站应用展望[J]. 华东电力, 2006, 34 (8): 47-53.
GAO Xiang. Application Prospects of Digital Substation[J]. East China Electric Power, 2006, 34 (8): 47-53.

- [7] 李文光, 刘昕戈, 康景利. 基于 IEC61850 和嵌入式以太网的变电站网络通信系统[J]. 仪表技术与传感器, 2006, 25 (9): 25-26.
LI Wen-guang, LIU Xin-ge, KANG Jing-li. Substation Network Communication System Based on IEC61850 and Embedded Ethernet[J]. Instrument Technique and Sensor, 2006, 25 (9): 25-26.
- [8] 王大鹏, 栗俊凯, 晁军征. 浅谈数字化变电站的发展及应用[J]. 山东电力技术, 2007, 14 (1): 14-18.
WANG Da-peng, LI Jun-kai, CHAO Jun-zheng. Brief Introduction of the Development and Application of Digital Substation[J]. Shandong Electric Power Technology, 2007, 14 (1): 14-18.
- [9] 吴在军, 胡敏强. 基于 IEC 61850 标准的变电站自动化系统研究[J]. 电网技术, 2003, 27 (10): 61-65.
WU Zai-jun, HU Min-qiang. Research on a Substation Automation System Based on IEC61850[J]. Power System Technology, 2003, 27 (10): 61-65.
- [10] 唐成虹, 宋斌, 胡国, 等. 基于 IEC 61850 标准的新型变电站防误系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (5): 96-99.
TANG Cheng-hong, SONG Bin, HU Guo, et al. A New Electric Anti-maloperation System Based on IEC 61850 Standard[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (5): 96-99.
- [11] 国家电网生[2003]243号文, 防止电气误操作装置管理规定[S].
State Grid[2003]243, Rule of the Anti-mistake Defense in Substation[S].
- [12] IEC. IEC 61850, Communication Networks and Systems in Substations[S].

收稿日期: 2009-06-21; 修回日期: 2009-09-07

作者简介:

丁峰(1978-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事变电站自动化与继电保护的研究和试验工作; E-mail: zepri@163.com

陆承宇(1973-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事变电站自动化与继电保护的研究和管理工作。

(上接第 30 页 continued from page 30)

Wakileh G J. Fundamental Principle, Analytical Method and Filter Design of Harmonious Waves in Power Systems[M]. XU Zheng, Trans. Beijing: China Machine Press, 2003.

- [8] 申爱兵. 有源电力滤波器谐波电流检测方法仿真研究(硕士学位论文)[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
SHEN Ai-bing. Harmonic Current Test Method and Simulation Study of APF, Thesis[D]. Beijing: North

China Electric Power University, 2006.

收稿日期: 2009-06-07; 修回日期: 2009-08-24

作者简介:

焦留成(1950-), 男, 博士, 教授, 主要从事直线电机理论与应用方面的研究;

陈群(1983-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统运行与分析研究. E-mail: chenqun-91520@163.com