

新型直流输电系统典型谐波分布特性分析

李 勇^{1,2}, 罗隆福¹, 贺达江¹, C. REHTANZ², 刘泽洪³, 刘福生¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082; 2. 德国多特蒙德大学电力系统与电能经济研究所, 德国多特蒙德市 44227; 3. 国家电网公司建设运行部, 北京市 100031)

摘要: 研究直流输电系统的谐波特性有助于分析谐波在电气设备、系统中的分布特点和谐波对电气设备的作用程度。介绍了一种基于新型换流变压器的直流输电系统及其采用的感应滤波技术, 建立了采用新型换流变压器及其感应滤波系统和采用传统换流变压器及其交流无源滤波系统时表征直流输电系统谐波特性的数学模型, 并从理论上对比分析了 2 种滤波技术对直流输电系统谐波特性的影响, 表明感应滤波技术能在阀侧绕组有效实现谐波屏蔽, 从而避免传统滤波方式在网侧实施谐波抑制给换流变压器带来的不利影响。通过动模试验验证了理论分析的正确性。

关键词: 直流输电; 谐波特性; 新型换流变压器; 感应滤波

中图分类号: TM721.1; TM76

0 引言

大功率电力电子变换装置的非线性导致直流输电系统在运行过程中存在大量谐波与无功功率, 不仅严重影响系统的电能质量, 还危及用户设备及周围通信系统, 甚至引起系统振荡^[1-5], 因此, 精确地分析与计算系统在运行过程中表征出来的谐波特性, 并以此为依据设计完备的谐波抑制与无功补偿装置一直都在直流输电工程建设中占据重要的地位。

对于目前常见的 12 脉动直流输电系统而言, 换流阀组在换相过程中会在交流系统产生各种特征谐波与非特征谐波^[6], 在馈入至交流电网时, 换流变压器承受了全部谐波分量, 并且还有相当部分的直流分量^[7-8], 而传统的谐波抑制与无功补偿方式只是被动地解决了交流电网的电能质量问题, 对于换流变压器这个重大的直流输电电气设备所遭受的谐波污染并未起到任何抑制作用。目前的做法只能是在换流变压器设计时计及谐波容量而留出相应的裕度, 并通过各种磁屏蔽技术、降噪技术和冷却装置被动地降低谐波在换流变压器中产生的危害^[9-10]。

基于新型换流变压器的直流输电系统力求在靠近谐波源(换流阀组)的阀侧耦合绕组抽头处对含量较重的主要次特征谐波就近抑制, 使其不经过换流

变压器的电磁变换作用而馈入至网侧绕组与交流母线, 试图从根本上解决谐波给换流变压器所带来的危害^[11-12]。由于新系统中换流变压器的绕组联结方式发生了改变, 并且采用了混合滤波方式, 即针对特征谐波在阀侧绕组实施感应滤波以及针对高次谐波在交流母线实施无源滤波, 则新系统的谐波特性较之传统直流输电有很大的不同。本文将通过与传统直流输电进行比较研究, 揭示基于新型换流变压器的直流输电系统所具有的独特的谐波特性以及产生这种谐波特性的机理。

1 主电路拓扑结构

图 1 给出了用于研究新型直流输电系统谐波特性的主电路拓扑结构。

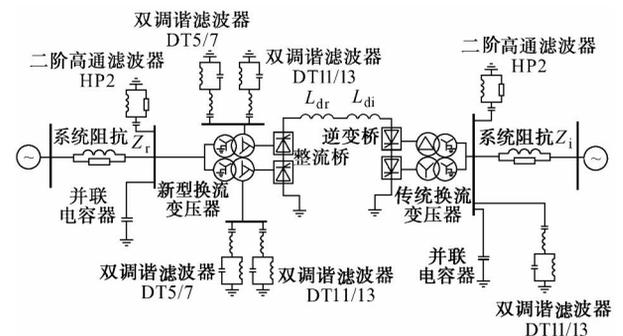


图 1 新型直流输电系统主电路拓扑结构

Fig. 1 Main circuit topology of the new HVDC system

由图可知, 其送端采用了新型换流变压器及其感应滤波系统, 新型换流变压器阀侧绕组采用延边三角形接线, 并在角接处引出抽头接入对特定次谐

收稿日期: 2008-07-17; 修回日期: 2009-03-12。

国家电网公司科技项目(20080046); 湖南省“十一五”重大科技专项资助项目(06GK1003-1); 湖南省研究生创新基金资助项目(521298295); 国家发明专利(L200310110677.2); 国家实用新型专利(ZL200720063111.2)。

波进行引流的调谐装置,通过阀侧延边三角形绕组的零等值阻抗设计与调谐装置的全调谐设计,两者协调作用从而达到感应滤波的目的,而网侧并入了对高次谐波加以调谐的二阶高通滤波器 HP2;受端采用的是传统换流变压器及无源滤波系统,交流侧所有的滤波装置、无功补偿装置均并接在网侧母线上。

2 谐波特性分析

2.1 新型换流变压器及其感应滤波系统谐波特性

图 2 给出了直流输电换流站采用新型换流变压器及其感应滤波系统所表征的谐波分布特性。

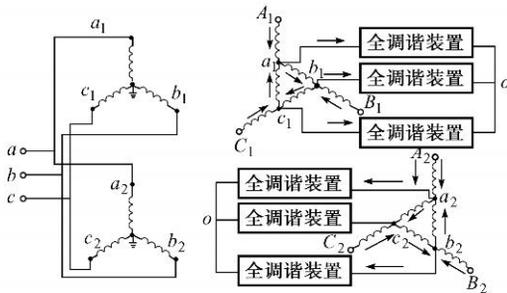


图 2 新型换流变压器及其感应滤波系统的谐波分布示意图

Fig. 2 Harmonic distribution of new converter transformer and its inductive filtering system

图中,箭头所示为换流桥在换相过程中所产生的 5 次、7 次、11 次、13 次特征谐波电流的流电路径;全调谐装置主要起到对这 4 种特征谐波引流的作用,目的是为变压器感应滤波创造必要的条件。图示所表征的感应滤波的机理是:在新型换流变压器阀侧延伸绕组通过谐波电流产生谐波磁动势条件下,角接公共三角形绕组会感生相反的谐波磁动势与之相抵消。延伸绕组通过的谐波电流与角接公共绕组感生的谐波电流满足如下谐波安匝平衡关系:

$$\begin{cases} W_3 I_{hA1a1} + W_2 I_{hc1a1} = 0 \\ W_3 I_{hB1b1} + W_2 I_{hb1a1} = 0 \\ W_3 I_{hC1c1} + W_2 I_{hb1c1} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} W_3 I_{hA2a2} + W_2 I_{hb2a2} = 0 \\ W_3 I_{hB2b2} + W_2 I_{hc2b2} = 0 \\ W_3 I_{hC2c2} + W_2 I_{ha2c2} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: W_3 和 W_2 分别表示阀侧延伸绕组与角接公共绕组的匝数。

同时,图 2 所示新型换流变压器阀侧延伸绕组与公共绕组角接点 a_1, b_1, c_1 与 a_2, b_2, c_2 处的电流还满足如下基尔霍夫电流定律(输入谐波电流为正,

输出谐波电流为负):

$$\begin{cases} I_{hA1a1} + I_{hc1a1} - I_{ha10} - I_{ha1b1} = 0 \\ I_{hB1b1} + I_{ha1b1} - I_{hb10} - I_{hb1c1} = 0 \\ I_{hC1c1} + I_{hb1c1} - I_{hc10} - I_{hc1a1} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} I_{hA2a2} + I_{hb2a2} - I_{ha20} - I_{ha2c2} = 0 \\ I_{hB2b2} + I_{hc2b2} - I_{hb20} - I_{hb2a2} = 0 \\ I_{hC2c2} + I_{ha2c2} - I_{hc20} - I_{hc2b2} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由此可知,只要图 2 所示新型换流变压器阀侧延伸绕组与角接公共绕组的谐波电流所产生的谐波磁动势能相互平衡,就不会在网侧绕组感生谐波电流,从而起到对主要谐波在靠近谐波源(换流阀组)处就近抑制的目的。当然,感应滤波方式的实现除了引流装置的全调谐设计外,还需要角接公共三角形绕组的零等值阻抗设计^[11]。换流阀组在运行过程中所产生的特征谐波电流可根据换流阀组的运行参数(触发角、换相角)以及直流系统运行参数(直流电流)求出,这种求解方法在实际工程中已经有工程计算公式可查^[6],在此不再赘述。在阀侧电流已知的条件下,由上述公式可方便地求得新型换流变压器各绕组中的主要谐波电流以及角接点引出抽头处全调谐装置所通过的谐波电流。

直流输电换流站采用新型换流变压器及其感应滤波系统时所体现出来的谐波特性是:换流阀组在运行过程中产生的谐波在通过换流变压器阀侧延伸绕组时,由于阀侧公共绕组感应滤波的作用,主要含量的特征谐波被屏蔽于阀侧绕组,通过换流变压器的主要是 23 次、25 次等含量很低的高次谐波,通过在网侧并接高通滤波器对高次谐波加以抑制,能完全保证网侧交流电源的纯净。值得说明的是,由于主要含量的谐波没有穿越新型换流变压器的网侧绕组,并且阀侧主要含量谐波电流所产生的谐波磁动势在运行过程中相互抵消,这样能大大降低谐波对换流变压器运行所造成的危害。

2.2 传统换流变压器及无源滤波系统谐波特性

图 3 给出了直流输电换流站采用传统换流变压器及无源滤波系统时的谐波分布。

图中,箭头所示为换流桥运行过程中所产生的全部谐波的流电路径。这些谐波在由阀侧绕组感应至网侧绕组时,满足如下谐波磁动势平衡关系:

$$\begin{cases} W_2 I_{hA1c1} + W_1 I_{hg1a1} = 0 \\ W_2 I_{hB1A1} + W_1 I_{hg1b1} = 0 \\ W_2 I_{hC1B1} + W_1 I_{hg1c1} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

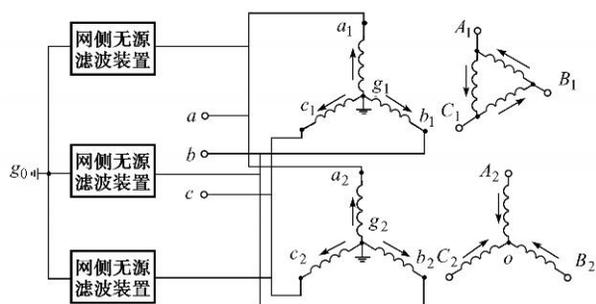


图3 传统换流变压器及其无源滤波系统谐波分布示意图

Fig. 3 Harmonic distribution of traditional converter transformer and ac passive filtering system

$$\begin{cases} W_2 I_{hA2o} + W_1 I_{hg2a2} = 0 \\ W_2 I_{hB2o} + W_1 I_{hg2b2} = 0 \\ W_2 I_{hC2o} + W_1 I_{hg2c2} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: W_1 和 W_2 分别表示传统换流变压器网侧绕组与阀侧绕组的匝数。

从传统换流变压器阀侧绕组经变压器电磁作用而感应至网侧绕组的谐波电流受网侧并联无源滤波装置的抑制作用,理想情况下,满足如下基尔霍夫电流定律(输入谐波电流为正,输出谐波电流为负):

$$\begin{cases} I_{hg1a1} + I_{hg2a2} - I_{hag0} = 0 \\ I_{hg1b1} + I_{hg2b2} - I_{hbg0} = 0 \\ I_{hg1c1} + I_{hg2c2} - I_{hcg0} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

上述所建立的方程组可用于分析与计算直流输电换流站采用传统换流变压器及交流无源滤波系统时谐波电流的分布特性。值得说明的是,为简化计算,本文只是讨论了无源滤波装置对谐波电流的完全抑制作用,而事实上,受系统阻抗的影响,在设计传统无源滤波装置时,是不能将滤波器达到全调谐状态的,即会有一小部分谐波穿越滤波装置而窜入交流母线,这也是传统无源滤波方式的缺陷所在。

由此可知,直流输电换流站采用传统换流变压器及交流无源滤波系统时所体现出来的谐波分布特性是:换流阀组在运行过程中产生的谐波在通过换流变压器时,由于变压器电磁变换的作用完全馈入网侧绕组,换流变压器在运行过程中必须承担所有谐波电流与谐波磁动势的作用而造成的危害。

3 理论计算与试验验证

为了进一步验证上述理论分析与仿真计算结果的正确性,针对图1所示新型直流输电系统动模试验平台,进行了相关的谐波特性测试试验。试验分2个阶段:一个阶段是新型换流变压器侧为整流,传

统换流变压器侧为逆变;另一个阶段是新型换流变压器侧为逆变,传统侧为整流。测试点同为整流稳态运行时新型换流变压器与传统换流变压器的阀侧与网侧,试验波形见图4、图5。理论计算与试验结果的对比如表1所示。

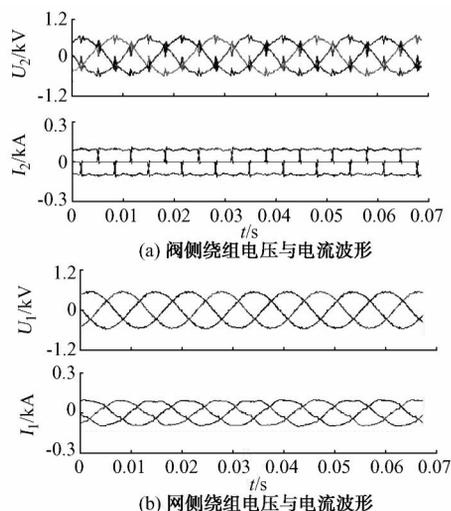


图4 新型换流变压器阀侧和网侧绕组电压与电流波形
Fig. 4 Voltage and current waveforms at valve winding and grid winding of new converter transformer

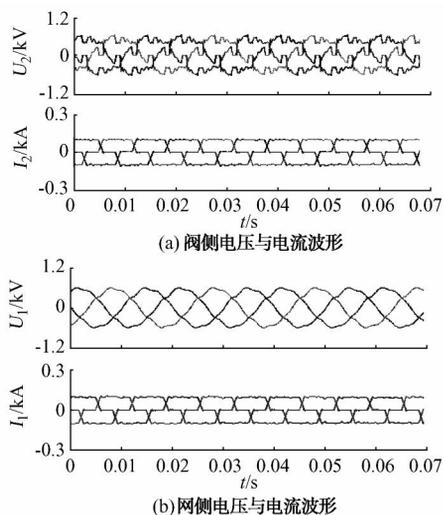


图5 传统换流变压器阀侧和网侧绕组电压与电流波形
Fig. 5 Voltage and current waveforms at valve winding and grid winding of traditional converter transformer

通过对比分析可见,新型换流变压器与传统换流变压器阀侧相电流的波形具有相似性,这主要是由换流阀组在稳态运行时所具有的相似性决定的;而新型换流变压器网侧电流波形畸变率明显小于传统换流变压器的网侧电流波形,这主要是由于新型换流变压器在阀侧绕组实施了感应滤波,主要次特征谐波已经在阀侧绕组中得到有效抑制,馈入网侧

绕组的只有少量高次谐波,而采用传统换流变压器时只能在交流网侧进行滤波,所有谐波均由阀侧绕组通过变压器的电磁变换馈入网侧绕组。由于谐波不能在变压器内部得到抑制,因此其网侧绕组电流畸变率较之新型换流变压器网侧绕组大很多,这进一步证实了理论计算模型计算结果的正确性。

表1 基于新型换流变压器的直流输电系统谐波电流分布的理论计算和试验测试结果

Table 1 Calculated and test results of harmonic currents of the HVDC system with inductive filtering technology

谐波次数	计算类型	谐波电流/A			
		新型换流变压器		传统换流变压器	
		阀侧	网侧	阀侧	网侧
5	理论值	15.28	0	15.28	15.28
	试验值	15.37	1.97	14.66	14.55
7	理论值	10.92	0	10.92	10.92
	试验值	11.05	1.03	9.63	9.41
11	理论值	6.94	0	6.94	6.94
	试验值	6.30	0.90	4.71	4.50
13	理论值	5.87	0	5.87	5.87
	试验值	5.35	0.56	2.83	3.26

图6和表2进一步给出了传统方案和新型方案电网侧的电压与电流波形及相关测试数据。

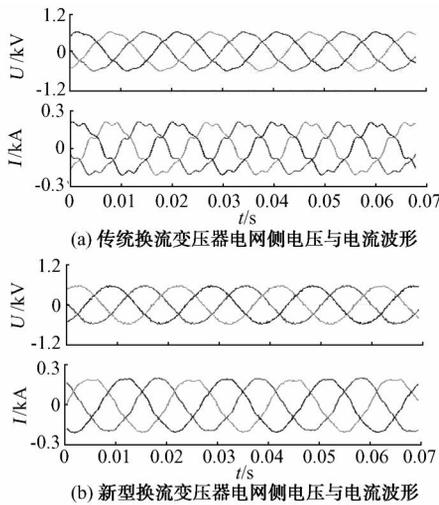


图6 传统换流变压器和新型换流变压器电网侧电压与电流波形

Fig. 6 Voltage and current waveforms at grid side of traditional and new converter transformer

表2 电网侧谐波电流的试验测试结果

Table 2 Test results of harmonic currents at the grid side

谐波次数	谐波电流/A	
	新型换流变压器电网侧	传统换流变压器电网侧
5	1.21	8.78
7	2.28	13.30
11	1.66	2.22
13	0.88	0.57

由此可见,通过在传统换流变压器网侧并接无源滤波装置,虽然对谐波电流有一定的抑制效果,但这种滤波效果由于受到无源滤波器固有的偏调谐及系统阻抗的影响,其滤波效果并不太理想,甚至发生了7次谐波电流的放大,而感应滤波由于全调谐的作用,在阀侧绕组已经实现了谐波的有效屏蔽,因此,网侧绕组及交流电网中谐波含量很少,这也是感应滤波的优越之处。图4(b)、图5(b)及表1、表2中的相关测试结果充分验证了感应滤波的这种优越的谐波屏蔽性能。

4 结语

基于新型换流变压器的直流输电系统在运行过程中所表征出来的谐波特性不同于传统的直流输电系统。换流阀组在换相过程中所产生的主要谐波电流在通过新型换流变压器及其感应滤波系统时,由于受到阀侧耦合绕组谐波安匝平衡的作用,被抑制于阀侧绕组与配套全调谐装置之中,只有少量的高次谐波通过阀侧绕组馈入网侧;而传统直流输电系统中,所有谐波电流完全通过传统换流变压器的阀侧绕组而馈入网侧绕组及交流电网。本文通过理论计算与试验结果分析,验证了基于新型换流变压器的直流输电系统谐波特性的数学模型的正确性,表明感应滤波技术具有良好的谐波屏蔽效果,能从根本上解决谐波给换流变压器运行带来的危害,这是传统无源滤波方式与有源滤波方式不能解决的。

参考文献

- [1] 赫巍,李兴源,金小明,等. 直流输电引起的谐波不稳定及其相关问题. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 94-99.
HAO Wei, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. A survey if harmonic instability and related problem caused by HVDC. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 94-99.
- [2] GUTIERREZ O, FUERTE-ESQUIVEL C R, RUBIO J A, et al. Harmonic analysis of AC/DC systems based on phase-domain multi-port network approach. Electric Power Systems Research, 2008, 78 (10): 1789-1797.
- [3] HAMMAD A E. Analysis of second harmonic instability for the Chateauguay HVDC/SVC scheme. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(1): 410-415.
- [4] JIANG Xiao, GOLE A M, A frequency scanning method for the identification of harmonic instabilities in HVDC systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(4): 1875-1881.
- [5] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制. 北京: 科学出版社, 1998.
- [6] 文闾成. 换流变压器的技术要求: 上. 变压器, 1996, 2: 2-6.
WEN Kaicheng. Converter transformer's technology demand: first part. Transformer, 1996, 2: 2-6.
- [7] 张波,赵杰,曾嵘,等. 直流大地运行时交流系统直流电流分布的

- 预测方法. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 84-88.
- ZHANG Bo, ZHAO Jie, ZENG Rong, et al. Estimation of DC current distribution in AC power system caused by HVDC transmission system in ground return status. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 84-88.
- [8] TELLES VILLAS J E, PORTELA C M. Calculation of electric field and potential distributions into soil and air media for a ground electrode of a HVDC system. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3): 867-873.
- [9] 杨一鸣, 章旭雯. 特高压直流换流站设备的降噪措施. 高电压技术, 2006, 32(9): 149-152.
- YANG Yiming, ZHANG Xiaowen. Study on noise reduce for equipment at UHVDC converter station. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 149-152.
- [10] 肖彩艳, 文继锋, 袁源, 等. 超高压直流系统中的换流变压器保护. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 91-94.
- XIAO Caiyan, WEN Jifeng, YUAN Yuan, et al. Protection of converter transformer in HVDC. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 91-94.
- [11] 李勇, 罗隆福, 许加柱, 等. 采用新型换流变压器的直流输电稳态模型. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 28-32.
- LI Yong, LUO Longfu, XU Jiazhu, et al. Steady state model of the DC transmission with new type converter transformer. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 28-32.
- [12] 李勇, 罗隆福, 刘泽洪, 等. 新型直流输电系统典型扰动暂态响应特性. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 31-34.
- LI Yong, LUO Longfu, LIU Zehong, et al. Transient response characteristics of a new HVDC transmission system subjected to the typical disturbances. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 31-34.

李 勇(1982—),男,博士研究生,主要研究方向:基于新型换流变压器的直流输电系统新理论、电能质量控制与电能经济管理技术及相关 HVDC & FACTS 技术。E-mail: hudaleeyong@yahoo.com.cn

罗隆福(1962—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:现代电器设备的设计和优化、新型换流变压器的研制和高压直流输电新理论。E-mail:llf@hnu.cn

贺达江(1966—),男,博士研究生,副教授,主要研究方向:新型变压器、输变电新理论与技术及谐波抑制与无功补偿。

Analysis of Harmonic Distribution Characteristics of a New DC Transmission System

LI Yong^{1,2}, LUO Longfu¹, HE Dajiang¹, C. REHTANZ², LIU Zehong³, LIU Fusheng¹

(1. Hunan University, Changsha 410082, China;

2. University of Dortmund, Dortmund 44227, Germany;

3. Department of Construction and Operation, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: An investigation is made on the harmonic distribution characteristics of the HVDC transmission system useful for analyzing the harmonic distribution in electric devices and electric system as well as the effect of harmonics on the electric devices. A new HVDC circuit topology using the new converter transformer and inductive filtering technology is described. The mathematical models for calculating the harmonic characteristics are developed for both the inductive and passive filtering technology and their effects of the HVDC harmonic characteristics are analyzed. It is shown that inductive filtering is capable of suppressing the harmonic at the valve side, thus avoiding the harm of the harmonic on the converter transformer brought about by traditional filtering. The correctness of the analysis is verified by test results.

This work is supported by the Scientific and Technological Foundation of State Grid Corporation of China (No. 20080046), Hunan Provincial Foundation for Key Scientific and Technological Projects (No. 06GK1003-1), Hunan Provincial Innovation Fund for Graduate Student (No. 521298295), State Patent Invention (No. L200310110677.2) and State Utility Model Patent (No. ZL200720063111.2).

Key words: HVDC; harmonic distribution; new converter transformer; inductive filtering

“嵌入式技术在电力系统中的应用”征文

《电力系统自动化》拟与研祥智能股份有限公司合作举办“研祥杯”嵌入式技术在电力系统中应用的技术论坛,面向电力行业的应用需求,征集各种嵌入式系统设计、开发和应用论文。优秀论文将发表在《电力系统自动化》上,并颁发证书,获奖论文作者将获得一份更加惊喜的奖励。详细请查阅本刊网站公告栏。请在2009年6月30日之前提交论文摘要;2009年8月31日前提交完整论文。联系人:代长振;投稿邮箱:mcu@sgepri.com;联系电话:025-83092380;通信地址:南京市南瑞路8号杂志社(210003)