

船舶变压器预充磁分析研究

张琦兵¹, 邵能灵¹, 王鹏², 倪明杰², 卫卫²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 中国船舶工业集团公司第七八研究所, 上海 200011)

摘要: 根据大型船舶电力系统的特殊情况, 对大容量变压器的预充磁技术进行了深入分析。根据大容量变压器空载合闸时励磁涌流的特点, 分析比较各种抑制励磁电流方法, 提出适用于大型船舶电力系统中的预充磁方案。对于串联电阻和利用小容量变压器预充磁两种方案, 利用 EMTP 建立了详细的仿真模型。仿真结果表明, 当分别选用合适的电阻大小或合闸时间后, 上述两种预充磁方案都能有效抑制励磁电流的大小, 适合应用于大型船舶电力系统。

关键词: 船舶电力系统; 变压器; 励磁涌流; 预充磁

Analysis of transformer pre-magnetizing in marine power system

ZHANG Qi-bing¹, TAI Neng-ling¹, WANG Peng², NI Ming-jie², WEI Wei²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

Abstract: This paper focuses on the pre-magnetizing methods, which are used to restrain the inrush current for the large capacity transformer in marine power system. Considering characteristics of inrush current when large-capacity transformers no-load close, all kinds of pre-magnetizing schemes are discussed and analyzed, based on which the pre-magnetizing schemes for large marine power system are proposed. The detailed simulation models of two suitable pre-magnetizing strategies such as the series resistance method and the small pre-magnetized transformer method are built by EMTP. The simulation results show that both the two pre-magnetizing schemes can restrain the inrush current when suitable resistance and breaker close time are chosen, which is suitable for large marine power system.

Key words: marine power system; transformer; inrush current; pre-magnetizing

中图分类号: TM41 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0145-05

0 引言

大型船舶电力系统中, 联接高压与低压电网的变压器以及换流变压器容量一般较大, 在全船负荷中占有相当的比重, 是船舶电力系统中的重要设备之一, 其正常运行对船舶电网的影响很大。正常运行时, 变压器的励磁电流很小, 一般为额定电流的1%~2%^[1]。当变压器空载合闸投入电网运行时, 铁心中磁通开始以空载合闸前铁心中的剩磁为起点, 按电源电压波形积分关系变化^[2]。由于铁心磁通的饱和以及铁心材料的非线性特性, 励磁电流可能达到极高的数值, 同时波形会产生严重畸变, 形成励磁涌流^[3-4]。励磁涌流可能会导致变压器继电保护的误动^[5]、大量的谐波会使船舶电力系统电能质量下降^[6]、高次谐波的电磁干扰还将影响变压器周围电子设备的正常运行。另外, 励磁涌流还将导致母线处较大的瞬态电压降, 从而影响船舶电力系统中其

他用电设备的正常运行。

为了抑制变压器空载合闸时产生的励磁涌流, 一般采取预充磁技术。本文主要对变压器各种预充磁技术进行分析, 考虑船舶变压器中性点不接地的特殊情况, 讨论了适合于船舶变压器的预充磁方案, 并且建立详细的变压器模型, 对可行的预充磁方案进行了仿真实验验证。

1 船舶变压器励磁电流的抑制分析

目前抑制变压器空载合闸时励磁电流大小的方法共有两类, 第一类是通过改变变压器结构来抑制励磁电流大小, 另一类则是采用预充磁技术。

1.1 改变变压器绕组结构

为了抑制空载合闸时的励磁涌流, 文献[7-8]针对变压器绕组进行分析, 研制能抑制励磁涌流的变压器绕组设计方案, 该方法通过改变一、二次绕组分布, 增加合闸过程中变压器的自感来达到抑制变

压器励磁涌流的目的。但是该方法改变了变压器内部的结构,可能会给变压器的稳定运行带来问题^[9]。文献[9]通过将三相变压器一次侧绕组从星形接地改变为 Zigzag 接法来抑制励磁涌流,但是此方法一方面会增加变压器的造价;另一方面,其对励磁涌流的抑制效果并不显著。

1.2 预充磁技术

另外一类能有效抑制励磁涌流的方法是对变压器进行预充磁。例如可以在变压器一次侧串联电阻^[10],先合闸电阻支路,延时后将电阻支路短路,使变压器投入运行;串联电阻一方面能限制励磁涌流的大小,另外能使暂态磁通快速衰减,从而抑制励磁涌流。励磁涌流主要由合闸瞬间的暂态磁通引起,为了使合闸瞬间暂态磁通为零,文献[11-14]提出一种能有效抑制励磁涌流的选相位分相合闸技术,主要是通过检测变压器中某一相的剩磁来确定此相的合闸相角,然后通过一定的延时合上另外两相。文献[15]结合了前述两种方法,通过在一次侧中性点串接电阻,并采用选相位分相合闸技术,能达到很好的励磁涌流抑制效果,但是此方案只适用于一次侧为星形接地的变压器。

文献[16]通过在变压器低压侧并联电容器,使低压侧产生的磁通与高压侧磁通极性相反,相互抵消抑制绕组内磁通达到饱和,从而防止了空载合闸时励磁涌流的产生。还有一种方法是从低压电网接通一台等压变比的小型变压器与中压变压器的次级绕组并联,中压变压器的初级绕组会感应一个高电压,经延时后,中压变压器主断路器合闸,然后再断开小变压器电路^[17]。

在船舶电力系统中,预充磁还应考虑船用变压器的特殊情况。为了提高安全性,船舶电力系统一般采取三相三线制,即中性点不接地的运行方式。其变压器一次侧一般为 Δ 接法,即使为星形接法,中性点也不会接地,所以在中性点串接电阻或选相位分相合闸技术的方法在船舶变压器中将无法采用。在低压侧并联电容器的方法由于电容器大小很难确定,实际应用中较少采用。因此适合于船用变压器的预充磁方案主要有串接电阻及并联变压器两种方案。

2 仿真模型的建立

图 1 所示为系统仿真模型单线图,利用 EMTP 建立变压器仿真模型如图 2。其中,变压器为三柱三相式 Δ /星形接法,变比为 6.6 kV/0.45 kV,容量 3.5 MVA。变压器高低压之间利用线性电感进行耦合,励磁线圈的饱和特性用非线性电感模拟。在

EMTP 中可以对输入的磁饱和数据进行曲线拟合,再通过计算得到非线性电感的磁滞回线,从而实现变压器的电磁暂态仿真。EMTP 通过录入数据拟合的磁饱和曲线如图 3 所示,其中,圆圈表示输入的原始数据,而曲线为 EMTP 拟合的磁饱和曲线。

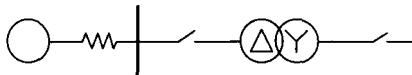


图 1 仿真系统图

Fig.1 Simulation system

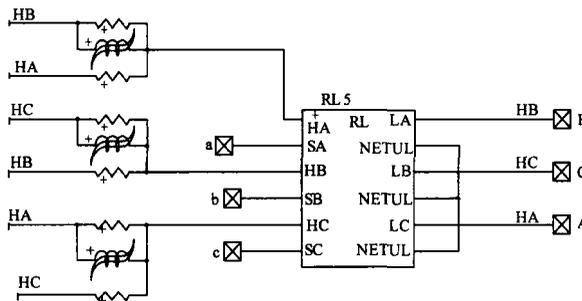


图 2 变压器的 EMTP 模型

Fig.2 EMTP simulation model of transformer

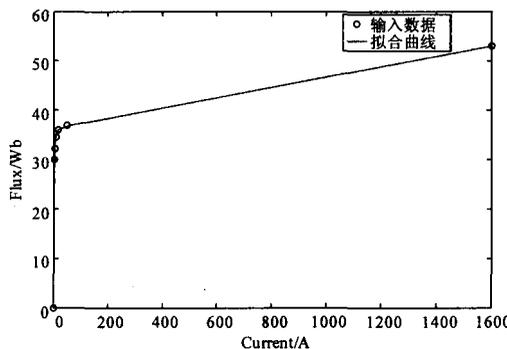


图 3 EMTP 拟合的磁饱和曲线

Fig.3 Magnetic saturation curve fitting by EMTP

3 仿真分析

3.1 串接电阻

图 4 与图 5 是剩磁 $\phi_0=18$ Wb 时不串接电阻与串接 30 Ω 电阻空载合闸时励磁电流的变化图形,其中实线、虚线和点划线分别为 A、B、C 相电流。图 4 所示是在 $t=165$ ms 时直接空载合闸,图 5 是先在 $t=85$ ms 时刻合上带电阻的支路,在 165 ms 时刻短接电阻支路,175 ms 时切除电阻支路。图 4 所示直接合闸时,三相的励磁电流变化并不相同,一般来说,总会存在某一相励磁电流较大,如图中 A 相,而另外的 B、C 两相励磁电流则较小。由图 5 可知,串联电阻后,一方面,励磁电流大为减小;另一方面,带电阻支路合闸后,励磁电流衰减与直接合闸

相比, 要快很多。

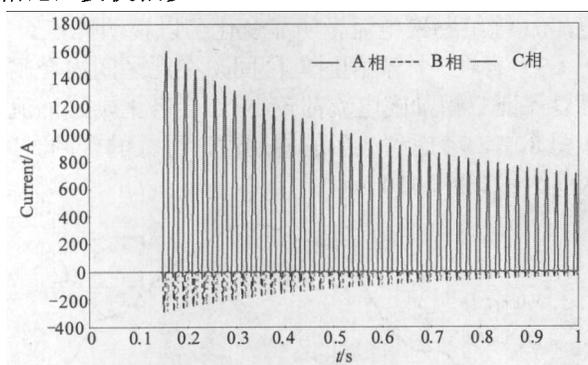


图4 直接合闸 ($\Phi_0=18$ Wb)

Fig.4 Switching in direct ($\Phi_0=18$ Wb)

表1 是对串联不同阻值、变压器中剩磁由0~27 Wb (0~0.9 pu) 变化时励磁电流的峰值 (合闸时刻统一为ab绕组端电压相角为零)。 Φ_0 表示剩磁, I_m 表示励磁电流大小, r_s 表示串联电阻。由表1可知, 串接电阻的效果是较为显著的, 励磁电流的抑

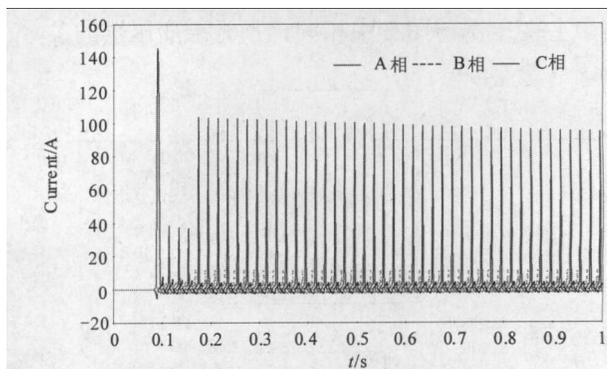


图5 串联30 Ω 电阻 ($\Phi_0=18$ Wb)

Fig.5 Switching in with 30 Ω resistance ($\Phi_0=18$ Wb)

制效果较好。但是最佳的串联阻值并不固定, 而是随剩磁大小的变化而变化。考虑到变压器剩磁大多分布在0.5~0.7 pu (15~21 Wb) 之间, 所以, 上述变压器模型的串联电阻一般选择在20~50 Ω 。

表1 不同剩磁与串接电阻大小时的励磁电流

Tab.1 Field current with different residual flux and resistance

r_s/Ω	Φ_0/Wb	0	6	12	15	18	21	27
0		901	1 139	1 375	1 490	1 607	1 720	1 954
1		720	893	1 059	1 139	1 217	1 294	1 442
5		401	483	556	590	621	651	702
10		260	309	349	367	383	398	417
20		152	178	197	206	213	218	223
25		125	146	161	168	173	177	184
30		106	123	136	141	146	148	200
50		63	74	102	132	162	194	269
100		26	84	213	263	311	360	462
105.5		23	82	226	277	327	378	483
110		29	99	236	289	341	393	499
120		47	114	259	315	370	425	536
150		104	162	326	392	455	518	644
300		325	404	617	716	808	895	1 068
1 000		760	982	1 197	1 303	1 407	1 510	1 706
2 000		886	1 114	1 338	1 449	1 557	1 665	1 870

3.2 变压器预充磁

另一种抑制合闸时励磁涌流的方案是串接小容量变压器。如图6所示为一典型船舶电力系统, 高压母线与低压母线间通过两台变压器TR1与TR2联接, 图中虚线框为两台用于对TR1与TR2进行预充磁的等压变比的小容量变压器PreTr1和PreTr2。通过变压器预充磁是假设某一台联络变压器已合闸, 低压母线已完全充电的情况下进行的。

假设TR2已合闸, 则TR1利用变压器PreTr2预充磁下的合闸过程如下: 首先合上QF2, 对PreTr2进行充磁, 由于PreTr2容量很小, 所以虽然有励磁涌流, 但是励磁电流值很小, 对电网影响不大; PreTr2充磁完毕后, 合闸QF3, 对TR1进行预充磁; 一定的延时后, 合闸QF1, 完成TR1的空载合闸; 随后延时切除PreTr2, TR1预充磁合闸过程完毕。

本文建立仿真模型进行变压器预充磁的仿真,

其中主变压器与图 2 中相同, 预充磁变压器的参数如图 6 所示。

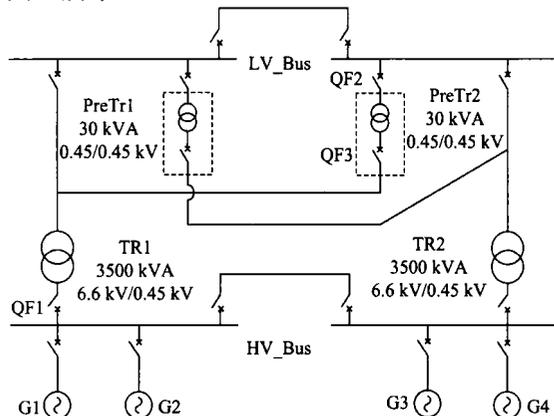


图 6 变压器预充磁方案原理接线

Fig.6 Single line diagram of small transformer pre-magnetizing scheme

如图 7 所示剩磁为零时进行变压器预充磁后变压器的励磁电流及磁通的变化。其合闸时间及顺序为: 85 ms 时 QF2 合闸, 随后 95 ms 时 QF3 合闸, 为了便于观察励磁电流及绕组磁通的变化, QF1 的合闸时间延后较多, 为 405 ms。由图可以看到, QF3 合闸后, 励磁电流虽有变化, 但是很小。到 QF1 合闸的时候, 由于绕组已建立了稳态磁通, 所以合闸后励磁电流变化不大。

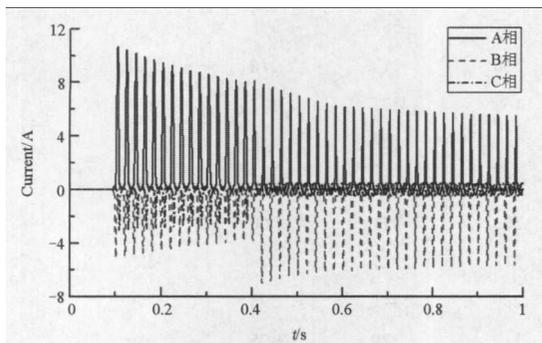


图 7 变压器预充磁时的励磁电流 ($t_c=405$ ms)

Fig.7 Field current of transformer pre-magnetizing scheme

虽然利用小容量变压器进行预充磁, 在主变压器合闸前其绕组已建立稳态磁通, 但是若合闸时机选择不合适, 仍然会有较大的励磁涌流。

图 8 是在有小容量变压器预充磁情况下, 选择不同合闸时间时励磁电流最大峰值与最小峰值的变化情况, 以 405 ms 为起点的一个周期内均匀选择 200 个时间点进行合闸操作的仿真结果。图 8 表明:

1) 不同的合闸时间对励磁电流影响很大, 如图 8 中 A 相峰值最小为 7 A, 而最大达到约 600 A, 相差 85 倍。

2) 对于 A、B、C 三相, 合闸时间的不同对其

影响是不同的, 图中 ab 与 ca 绕组励磁电流变化剧烈, bc 绕组励磁电流无明显变化可以说明此点。

3) 存在一个合闸时间区间, 在此区间内合闸, 可以保证三相励磁电流都较小, 不会产生励磁涌流。如图 8 中, 考虑到波形的周期性, 可行的合闸时间区间为: 402~410 ms。

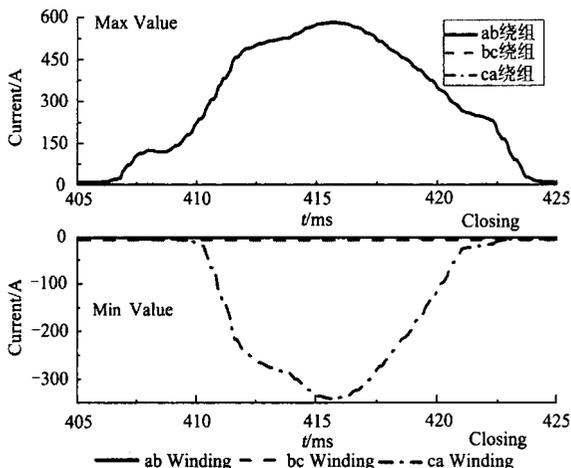


图 8 不同合闸时间时励磁电流最大、最小值

Fig.8 The max and min field current with different switching time

图 9 是考虑变压器剩磁时的仿真结果, 主变压器合闸时间选择为 405 ms。各绕组的剩磁分别为 $\Phi_0^{ab} = 27$ Wb, $\Phi_0^{bc} = -9$ Wb, $\Phi_0^{ca} = -18$ Wb。对比图 7 与图 9 可知, 励磁电流较无剩磁时有所增大, 但是电流值本身保持在很小的水平。所以利用小容量变压器进行预充磁时, 如果选择合适的合闸时间, 主变压器的剩磁虽对励磁电流有所影响, 但是励磁电流水平较小, 不会产生励磁涌流, 说明了利用小容量变压器对主变压器进行预充磁的有效性。

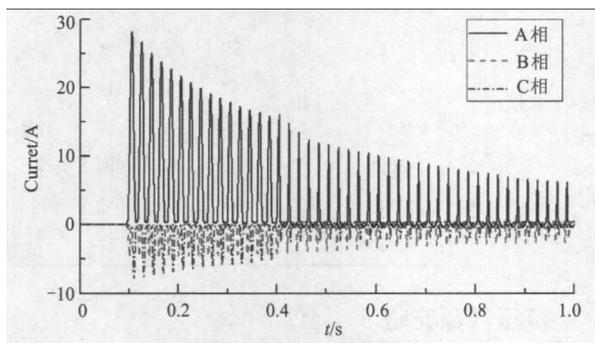


图 9 有剩磁时变压器预充磁

Fig.9 Transformer pre-magnetizing with residual flux

4 结论

由于绕组中磁势不能突变及变压器铁芯的磁饱和特性, 空载合闸于变压器时, 励磁电流将达到极

高的数值, 同时波形会产生严重畸变, 形成励磁涌流, 对船舶电力系统产生严重影响。本文针对船舶电力系统, 对各种现有预充磁或励磁涌流抑制方案进行分析, 讨论了适合于原边为 Δ 接线的变压器的预充磁方案。

本文的分析表明, 适合于 Δ 接线的预充磁方案主要有串接电阻和串联变压器两种方案。串接电阻方案励磁电流抑制效果稍差, 但是其实现方便。串联变压器的方案效果较好, 但是前提是能对合闸时间进行较好的控制。从实用与经济性上来说, 串联变压器方案是一个良好选择。但是不能忽视的是其适用条件——不能单独使用, 因为, 串联变压器方案需要对低压母线进行充电, 实际上是要求有变压器已经合闸。所以在船舶电力系统中, 除了利用小容量变压器进行预充磁外, 还应考虑串接电阻的变压器预充磁方案。

参考文献

- [1] 许实章. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [2] 梁劲辉, 李长捷, 王奕松. 变压器空载合闸瞬变过程分析[J]. 农机化研究, 2003 (2): 229-230.
LIANG Jin-hui, LI Chang-jie, WANG Yi-song. Analysis of instantaneous change progress when transformer no-load switch on[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2003 (2): 229-230.
- [3] 李晓萍, 文习山, 蓝磊, 等. 单相变压器直流偏磁试验与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 33-40.
LI Xiao-ping, WEN Xi-shan, LAN Lei, et al. Test and simulation for single-phase transformer under DC bias[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (9): 33-40.
- [4] 曹林, 何金良, 张波. 直流偏磁状态下电力变压器铁心动态磁滞损耗模型及验证[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (24): 141-146.
CAO Lin, HE Jin-liang, ZHANG Bo. Dynamic hysteresis loss model of power transformer under DC current biasing and its verification[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (24): 141-146.
- [5] 吴奕. 主变空载合闸涌流造成微机差动保护跳闸的分析[J]. 江苏电机工程, 2004, 23 (4): 61-63.
WU Yi. Analysis of mal-tripping of main transformer digital differential protection due to inrush current[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2004, 23 (4): 61-63.
- [6] 田立军, 秦英林, 孙晓明. 变压器空载合闸导致电能质量问题研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (3): 41-43.
TIAN Li-jun, QIN Ying-lin, SUN Xiao-ming. Study of power quality problems caused by no-load transformer commission[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25 (3): 41-43.
- [7] Cheng C K, Chen J F, Liang T J, et al. Transformer design with consideration of restrained inrush current[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28 (2): 102-108.
- [8] Cheng C K, der Chen S, Chen J F, et al. Transformer design for reducing the inrush current by asymmetrical winding[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A, 2005, 28 (5): 811-818.
- [9] 谢达伟, 洪乃刚, 傅鹏. 一种变压器空载合闸励磁涌流抑制技术的研究[J]. 电气应用, 2007, 26(3): 34-38, 28.
XIE Da-wei, HONG Nai-gang, FU Peng. Research on a technology restraining inrush current for switching-in no-load transformer [J]. Electrotechnical Application, 2007, 26 (3): 34-38, 28.
- [10] 陈瑞. 预充磁在抑制变压器空载合闸励磁涌流中的作用[J]. 船电技术, 2009, 29 (1): 24-26.
CHEN Rui. Effect of pre-magnetization at restraining inrush current for switching-in no-load transformer[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2009, 29 (1): 24-26.
- [11] Brunke J H, Fr Hlich K J. Elimination of transformer inrush currents by controlled switching-part I: theoretical considerations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16 (2): 276-280.
- [12] Brunke J H, Fr Hlich K J. Elimination of transformer inrush currents by controlled switching-part II: application and performance considerations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16 (2): 281-285.
- [13] Abdulsalam S G, Xu W. A sequential phase energization method for transformer inrush current reduction-transient performance and practical considerations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (1): 208-216.
- [14] 唐博, 彭安金, 王高丰, 等. 采用选相位关合技术消除变压器空载合闸的励磁涌流[J]. 电气开关, 2007, 45 (3): 22-25.
TANG Bo, PENG An-jin, WANG Gao-feng, et al. Elimination of inrush currents by controlled switching when energizing no-load transformer [J]. Electric Switcher, 2007, 45 (3): 22-25.
- [15] 郝治国, 张保会, 褚云龙, 等. 变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究[J]. 高压电器, 2005, 41 (2).
HAO Zhi-guo, ZHANG Bao-hui, CHU Yun-long, et al. Study on inrush current restraining technology when energizing no-load transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41 (2).

(下转第 154 页 continued on page 154)

证, 并与 PI 控制进行对比。仿真结果证明了此控制策略的可行性和高效性。

参考文献

[1] YE Yang, Kazerani Mehrdad, Quintana H V. Current-source converter based STATCOM: modelling and control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (2): 795-800.

[2] YU Qing-guang, LI Pei, LIU Wen-hua, et al. Overview of STATCOM technologies[C]. //IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. 2004: 647-652.

[3] 舒泽亮, 丁娜, 郭育华, 等. 基于SVPWM的STATCOM电压电流双环控制[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(9): 27-30.

[4] 刘黎明. 柔性交流输电系统中电力电子装置运行特性分析及实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.

[5] 孙丽颖, 冯佳昕, 赵军. STATCOM的非线性鲁棒控制器设计[J]. 东北大学学报, 2009, 30 (4): 466-470. SUN Li-ying, FENG Jia-xin, ZHAO Jun. Design of a nonlinear robust controller for STATCOM[J]. Journal of Northeastern University, 2009, 30 (4): 466-470.

[6] YANG Zhi-ping, SHEN Chen, Crow Mariesa L, et al. An improved STATCOM model for power flow analysis[C]. // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. 2000: 1121-1126.

[7] 范高锋, 迟永宁, 赵海翔, 等. 用STATCOM 提高风电场暂态电压稳定性[J]. 电工技术学报, 2007, 22 (11): 158-162. FAN Gao-feng, CHI Yong-ning, ZHAO Hai-xiang, et al. Transient voltage stability enhancement of wind farm using STATCOM[J]. Transactions of China

Electrotechnical Society, 2007, 22 (11): 158-162.

[8] 李春文, 冯元焜. 多变量非线性控制的逆系统方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[9] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[10] 李庚银, 陈志业, 丁巧林, 等. 坐标系下广义瞬时无功功率定义及其补偿[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16 (3): 176-179.

[11] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波检测和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[12] 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆控制方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[13] 高龙, Hill D J, 王幼毅, 等. 非线性系统的DFL和隐动态[J]. 清华大学学报, 1996, 36 (9): 1-8. GAO Long, Hill D J, WANG You-yi, et al. Direct feedback linearization of nonlinear control systems and the hidden dynamics[J]. Journal of Tsinghua University, 1996, 36 (9): 1-8.

[14] WANG Ben, TIAN Lian-fang, MAO Zong-yuan. Variable structure control of large synchronous generator[C]. // IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. 1999: 1134-1139.

[15] 杜继伟. 含静止无功补偿器的电力系统非线性协调滑模控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.

收稿日期: 2009-09-11; 修回日期: 2009-11-09

作者简介:

单翀隼 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为非线性控制理论在FACTS技术中的应用; E-mail: shanchonghao@yahoo.com.cn

王奔 (1960-), 男, 博士后, 教授, 主要研究方向为电力系统非线性控制。

(上接第 149 页 continued from page 149)

[16] Van Riet M J M, Buesink D J W. The advantage of implementing corrective capacitors mounted directly on the low voltage side of a high voltage power transformer[C]. // Electricity Distribution, CIRED. 1993.

[17] 张海荣, 朱涤, 徐丹铮, 等. 4 000 t 起重船的中压电力系统设计[J]. 船舶, 2005 (6): 27-30. ZHANG Hai-rong, ZHU Di, XU Dan-zheng, et al. Design of the intermediate voltage power system for the 4 000 t crane ship[J]. SHIP & BOAT, 2005 (6): 27-30.

收稿日期: 2009-10-18; 修回日期: 2009-10-28

作者简介:

张琦兵 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事船舶电力系统、电力系统继电保护及稳定控制研究; E-mail: zqb_312@163.com

邵能灵 (1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护、电站自动化、稳定控制及电力市场方向的研究;

王鹏 (1978-), 男, 电气工程师, 主要从事船舶电气研究设计工作。