

负载不平衡环境下链式STATCOM的控制方法

针对负载不平衡环境下链式静止同步补偿器(STATCOM)的控制问题,建立了其不平衡条件下正序、负序数学模型,构建了正序及负序环境下链式STATCOM的神经元解耦控制模型,提出一种基于神经元解耦的负载不平衡下链式STATCOM的正序-负序双环控制方法,正序控制环控制STATCOM装置补偿负载所需无功,负序控制环补偿负载不平衡情况下的负序电流,引入神经网络提高系统响应速度及控制准确度。采用主从控制方案实现控制要求,主控制器用于实现负载不平衡下正序-负序双环控制算法;从控制器利用有功电压均等分配的控制方法来实现各模块直流侧电容电压平衡。仿真与实验表明:该方法可以有效地解决链式STATCOM对不平衡负载的补偿问题,具有一定的工程参考价值。

唐 琪/中国葛洲坝集团机械船舶有限公司

0 引言

随着大量不对称、冲击性负载在电力系统中的接入,导致电力系统不平衡现象在实际运行中普遍存在。链式静止同步补偿器(STATCOM)由于具有可模块化、体积小及无须接入变压器^[1-3]等诸多优点成为近年来的关注焦点,与此同时链式STATCOM具有分相调节的能力及可变调制比,使其具备对不平衡负载补偿的潜力。针对负载不平衡环境下链式STATCOM控制问题,文献[4]以链式STATCOM特殊的电路结构为出发点提出分相控制,使装置在电压不对称状况下具备很强的适应能力,但其在补偿过程中降低了STATCOM装置无功响应的速度;文献[5]提出了基于逆系统方法的有功和无功功率解耦脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)控制,使链

式STATCOM装置的无功响应速度得到提高,但未解决不平衡状况下装置的运行问题;文献[6]提出反故障的变压器隔离型链式STATCOM的控制方法,但其应用范围较窄,对于无变压器型的链式STATCOM不适用;文献[7]提出在同步旋转坐标系下进行电流跟踪控制,但其不太适于补偿不平衡负载工况;文献[8]通过利用链式星形结构STATCOM装置换流链的连接点电位可浮动变化的特性,提出了基于零序电压叠加的控制方法,该方法对不平衡负载的补偿效果较好。但其零序电压的计算方法较为复杂,且采用的无差拍控制策略需要依赖于准确的无源器件参数及准确的数学模型。

本文建立了不平衡环境下链式STATCOM正序、负序数学模型,构建了正序及负序环境下链式STATCOM的神经元解耦控制模型,提出一种基于神经元解耦的负载不平衡下链式STATCOM的正序-负序双环控制方法,通过正负序控制环同时对负载无功及负序分量进行补偿,最后通过仿真实验验证了该方法的正确性及有效性。

1 链式STATCOM正负序数学模型

链式STATCOM主电路拓扑结构如图1所示。 u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 为系统电压; L 为滤波电感; R 为等效电阻; u_{ca} 、 u_{cb} 和 u_{cc} 为链式STATCOM输出电压; i_a 、 i_b 和 i_c 为补偿电流; u_{dc1} 、 u_{dc2} 、 $\dots$ 、 u_{dcN} 为各模块直流侧电容电压;链式STATCOM每相链节由 N 个H桥逆变器构成。



唐 琪/工程师

关键词/Keywords

不平衡·
链式STATCOM·
神经元解耦·
主从控制·

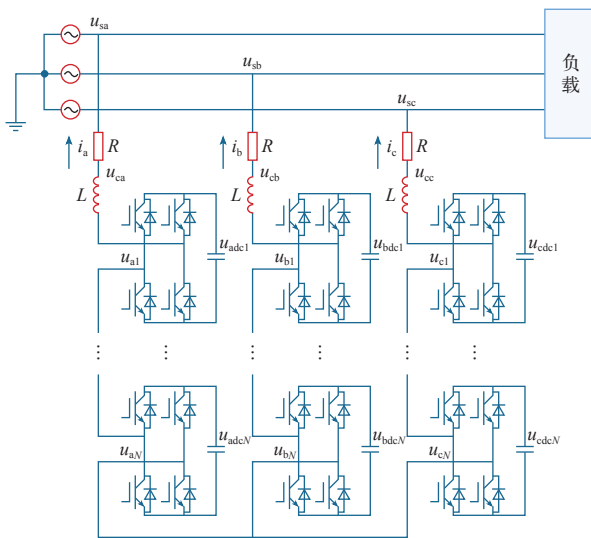


图1 链式STATCOM主电路拓扑

本文采用三相三线制接法，系统不平衡状况下，只对正序及负序分量（分别以上标“p”、“n”表示）进行考虑，根据图1，则正负序环境下链式STATCOM的电压方程可表示为

$$\begin{cases} u_{sa}^p = Ri_a^p + L \frac{di_a^p}{dt} + u_{ca}^p \\ u_{sb}^p = Ri_b^p + L \frac{di_b^p}{dt} + u_{cb}^p \\ u_{sc}^p = Ri_c^p + L \frac{di_c^p}{dt} + u_{cc}^p \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{sa}^n = Ri_a^n + L \frac{di_a^n}{dt} + u_{ca}^n \\ u_{sb}^n = Ri_b^n + L \frac{di_b^n}{dt} + u_{cb}^n \\ u_{sc}^n = Ri_c^n + L \frac{di_c^n}{dt} + u_{cc}^n \end{cases} \quad (2)$$

选择电网电压通用矢量与 d 轴重合，利用 $d-q-0$ 变换，得到链式STATCOM正序、负序环境下的数学模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d^p \\ i_q^p \end{pmatrix} = \frac{1}{L} \begin{pmatrix} u_{sd}^p - u_{cd}^p \\ u_{sq}^p - u_{cq}^p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ \omega & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d^p \\ i_q^p \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d^n \\ i_q^n \end{pmatrix} = \frac{1}{L} \begin{pmatrix} u_{sd}^n - u_{cd}^n \\ u_{sq}^n - u_{cq}^n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ \omega & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d^n \\ i_q^n \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中， u_{sd}^p 、 u_{sq}^p 为网侧正序有功和无功电压； u_{sd}^n 、 u_{sq}^n 为网侧负序有功和无功电压； u_{cd}^p 、 u_{cq}^p 为正序有功和无功电压； u_{cd}^n 、 u_{cq}^n 为负序有功和无功电压； i_d^p 、 i_q^p 为正序有功和无功电流； i_d^n 、 i_q^n 为负序有功和无功电流。

2 基于神经元解耦的正序-负序双环控制方法

2.1 神经元解耦算法

人工神经元模型可以看成为一个非线性单元，其输入输出关系可表示为

$$I_i = \sum_{j=1}^n \omega_{ij} x_j - \theta_i \quad y_i = f(I_i) \quad (5)$$

式中， x_j 为输入信号； θ_i 为阈值； ω_{ij} 为神经元 j 到神经元 i 的连接权值； $f(\cdot)$ 为响应函数。

神经元的学习规则采用 δ 学习规则，为有教师学习，响应函数取 $f(x)=x$ ，则权值的调整量为

$$\Delta \omega_{ij} = \eta (\bar{y}_i - y_i) x_j \quad (6)$$

式中， η 为学习速率； $\bar{y}_i$ 、 y_i 为期望输出和实际输出。

利用上述的学习规则可以实现各输入量权值的自动调节，以适应被控对象的状态变化，可以把神经元控制器看做为一个变系数的自适应控制器，经过学习后可以逼近任意非线性函数。将神经元控制器应用于非线性多变量强耦合系统，原非线性系统可以转化为一个多变量线性系统，以实现原系统解耦。对于两输入两输出强耦合系统应用神经元解耦控制的结构框图如图2所示。

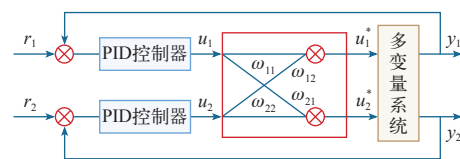


图2 神经元解耦控制框图

图2中的神经元解耦控制器算法为

$$\begin{cases} u_i^*(t) = \sum_{j=1}^2 \omega_{ij} u_j(t) \\ \omega_{ij}(t+1) = \omega_{ij}(t) + \eta_{ij} [\bar{u}_i^*(t) - u_i^*(t)] u_j(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中， $i, j=1, 2$ ， ω_{ij} 为各神经元权值的初始值，

当 $i=j$, $\omega_{ij}=1$; 当 $i \neq j$, $\omega_{ij}=0$ 。

2.2 正序-负序双环控制

系统不平衡情况下, 需要考虑对负序分量的补偿, 神经元解耦控制器具有较强的鲁棒性与自适应性, 且不依赖于被控对象准确的数学模型^[9], 本文引入神经网络, 提出一种新的正序-负序双环控制方法, 通过相互独立的正序电流环和负序电流环补偿系统无功及负序电流。

根据链式STATCOM正序、负序环境下的数学模型, 可知, 其为两输入两输出非线性强耦合系统, 在正序环境下, 采用矩阵建立其表达式为

$$\begin{pmatrix} i_d^p \\ i_q^p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{cd}^p \\ u_{cq}^p \end{pmatrix} \quad (8)$$

所设计的正序环境下神经元解耦控制器的输入输出为

$$\begin{pmatrix} u_{cd}^p \\ u_{cq}^p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} \\ \omega_{21} & \omega_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d^p \\ i_q^p \end{pmatrix} \quad (9)$$

将式(9)带入式(8)构成一个新的广义对象为

$$\begin{pmatrix} i_d^p \\ i_q^p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} \\ \omega_{21} & \omega_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d^p \\ i_q^p \end{pmatrix} \quad (10)$$

为了实现正序系统解耦控制目的, 以广义对象的误差作为目标函数

$$J_i = \frac{1}{2} [r_i(t) - y_i(t)]^2 \quad (11)$$

采用梯度下降法使目标函数 J_i 达到最小值

$$\frac{\partial J_i}{\partial \omega_{ij}(t)} = -(r_i - y_i) \frac{\partial y_i}{\partial \omega_{ij}} = -[r_i(t) - y_i(t)] \frac{\partial y_i(t) \partial u_j^*(t)}{u_j^*(t) \partial \omega_{ij}(t)} \quad (12)$$

由于对象 J_i 参数未知, 无法直接对 $\partial y_i(t) / [u_j^*(t)]$ 进行计算, $\partial y_i(t) / [u_j^*(t)]$ 的数值及正负决定了神经元的收敛速度和收敛方向, 在式(12)中其仅为 $\partial J_i / [\partial \omega_{ij}(t)]$ 的一个乘积项, 采用 y_i 及 u_i^* 变化量的符号函数 $\text{sgn}\{[y_i(t) - y_i(t-1)][u_i(t-1) - u_i(t-2)]\}$ 来替代 $\partial y_i(t) / [u_j^*(t)]$, 而 $\partial u_j^*(t) / [\partial \omega_{ij}(t)] = u_j^*(t)$, 有

$$\begin{cases} \omega_{ij}(t+1) = \omega_{ij}(t) + \eta_{ij} [r_i(t) - y_i(t)] \\ \text{sgn} = (\Delta y_i \times \Delta u_i) u_j(t) & i \neq j \\ \omega_{ij} = 1 & i = j \end{cases} \quad (13)$$

式中, η_{ij} 为神经元的学习速率, 为了实现系统的静态解耦, 神经元的权值会根据偏差 $[r_i(t) - y_i(t)]$ 的变化而变化, 直到系统输出和期望输出一致为止。

根据式(3)、式(4), 可知链式STATCOM在正序-负序环境下具有相同的数学模型。同理, 在负序系统下, 采用矩阵建立其表达式为

$$\begin{pmatrix} i_d^n \\ i_q^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{cd}^n \\ u_{cq}^n \end{pmatrix} \quad (14)$$

所设计的负序环境下神经元解耦控制器的输入输出为

$$\begin{pmatrix} u_{cd}^n \\ u_{cq}^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} \\ \omega_{21} & \omega_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d^n \\ i_q^n \end{pmatrix} \quad (15)$$

可构成广义对象为

$$\begin{pmatrix} i_d^n \\ i_q^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} \\ \omega_{21} & \omega_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d^n \\ i_q^n \end{pmatrix} \quad (16)$$

同理, 在负序环境下做上述计算, 可以构建链式STATCOM负序环境下的神经元解耦控制模型。

链式STATCOM正序-负序双环控制框图如图3a所示。

正负序电流检测如图3b所示, 三相电流 i_a 、 i_b 和 i_c 经过 $-\omega$ 的dq变换, 其负序电流和正序电流分

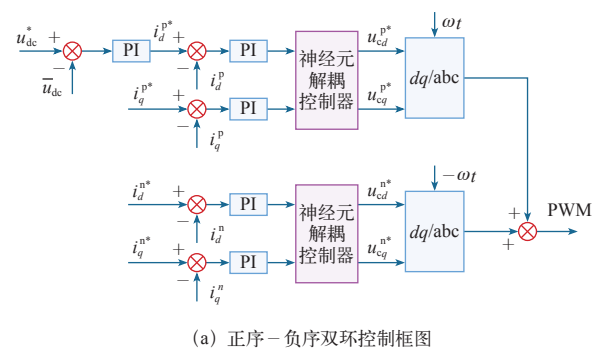
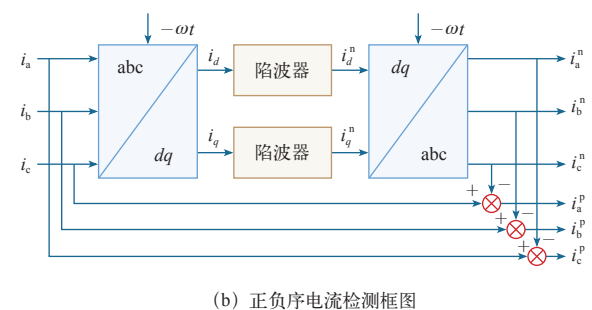


图3 链式STATCOM正序-负序双环控制框图

别变成了直流量及2倍频的谐波量,设计陷波器的频率为 2ω 滤除2倍频的正序分量,便可得到负序电流分量。

图3中分别由互相独立的正序控制环和负序控制环共同组成控制系统。在正序控制环中,当神经元通道1发生扰动, $\omega_{11}=1$,设计PI控制器来消除本通道误差。通道2由于耦合因素会受到干扰,此时神经元控制器通过修改连接权值 ω_{21} 来消除通道1对通道2的耦合作用实现解耦。通道2对通道1的影响同通道1对通道2的影响,负序控制环中与上述同理。通过正序控制环和负序控制环可以分别得到装置输出的正序电压指令 u_{ca}^{p*} 、 u_{cb}^{p*} 和 u_{cc}^{p*} 及负序电压指令 u_{ca}^{n*} 、 u_{cb}^{n*} 和 u_{cc}^{n*} 。将正负序电压指令叠加作为调制波参与单极倍频载波移相调制(CPS-SPWM),调整装置的输出电压使系统快速跟踪补偿不平衡负载的无功电流和负序电流。

2.3 系统整体控制方案

系统整体控制框图如图4所示,采用主从控制方案,主控制器用于实现系统不平衡下正序-负序双环控制算法,控制链式STATCOM对不平衡负载的补偿;从控制器利用有功电压均等分配来实现各H桥模块直流侧电容电压平衡。图中 u_{cd} 为STATCOM装置交流侧有功电压, u_{dc1} , u_{dc2} , $\dots$, u_{dcN} 分别为各H桥模块直流侧直流电容电压, Δu_{dc1} , Δu_{dc2} , $\dots$, Δu_{dcN} 为各H桥模块所需交流侧有功分量。

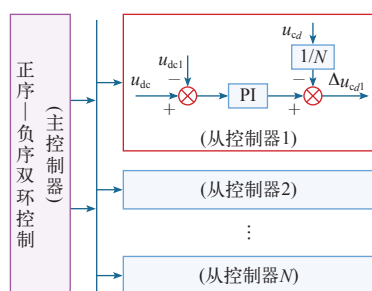


图4 系统整体框图

3 仿真分析与实验结果

3.1 仿真

为验证本文所提方法的正确性及有效性,在

Matlab/Simulink环境中搭建了链式STATCOM的仿真模型,仿真参数如下:电网线电压为10 kV,频率为50 Hz,开关频率为2 kHz,直流侧电容为5 mF,单相级联模块数为12个。

在仿真开始时加入不平衡负载,链式STATCOM未投入运行。图5为未投入链式STATCOM时电网电流波形。可以看出,由于不平衡负载的加入,电网电流包含负载中的负序分量,由于负序分量的影响,电网电流会出现一定程度的不平衡,此时,a相、b相和c相电流分别为613 A、647 A和695 A,电网电流不平衡度为12.58%。

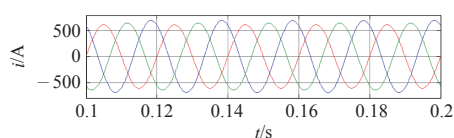
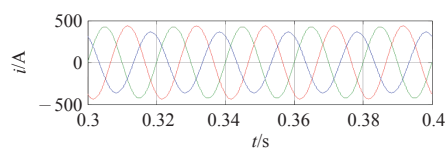
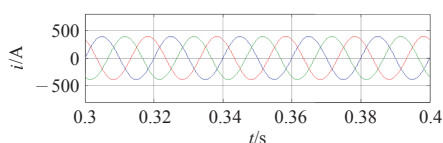


图5 未投入链式STATCOM时电网电流波形

将传统正序无功控制方法与本文所提控制方法进行对比,来验证本文所提方法的正确性及有效性。图6为两种控制方法下电网电流波形,图6a、b分别为投入链式STATCOM后传统正序无功控制方法及本文所提方法下的电网电流波形。由仿真波形可以看出,由于负序分量的存在,在传统正序无功控制方法下,只对正序分量进行了补偿,未考虑负序分量,电网电流中存在的负序有功及无功分量未得到任何改善,电网电流中负序分量的比例进一步上升,其中,a相、b相和c相电流分别为426 A、435 A和362 A,电网电流不平衡度为17.91%。在本文所提控制方法下,该方法正序控制环及负序控制环分别对正序及负序分量进



(a) 传统正序无功控制方法



(b) 正序-负序双环控制

图6 投入链式STATCOM后电网电流

行补偿, 补偿后电网电流只含正序有功电流, 电网电流不平衡改善明显, 其中, a相、b相和c相电流分别为392 A、391 A和392 A, 电网电流不平衡度为0.3%。可见, 采用传统方法难以消除电网电流的不平衡, 运用本文所提控制方法, 可以有效地对负载正序无功、负序有功和无功分量进行补偿, 改善系统电能质量。

设置电源侧不平衡模拟电网故障。图7为电源侧不平衡时两种控制方法下电网电流波形, 图7a、b分别为传统正序无功控制方法及本文所提方法下的电网电流波形。可以看出, 传统正序无功控制无法对负序分量进行补偿, 电网故障情况下, 负序分量在电网电流中所占的比例会进一步上升, 此时a相、b相和c相电流分别为451 A、419 A和357 A, 电网电流不平衡度为22.98%。本文所提方法下, 由于考虑了负序分量的补偿, 当系统不平衡时, 该控制方法可以有效地对目标值进行跟踪, 使电网电流只含有有功分量, 此时a相、b相和c相电流分别为402 A、403 A和401 A, 电网电流不平衡度为0.50%。

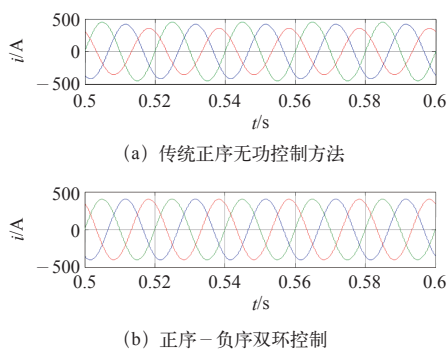


图7 电网故障下电网电流

3.2 实验

链式STATCOM每相由3个H桥功率模块串联而成, 主电路采用星形联结, 系统电压为300 V, 频率为50 Hz, 连接电抗为25 mH, 载波频率为1 000 Hz, 采样频率为3 000 Hz。分别在只有正序无功控制和正负序同时控制的情况下进行实验验证。图8为两种控制方法下系统电流波形, 图8a、b分别为传统正序无功控制方法及本文所提方法下的系统电流波形。可以看出, 只进行正序无功控制时, 系统

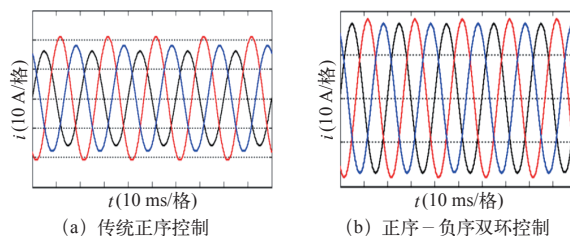


图8 系统电流波形

电流分别为16 A、21 A和18 A, 电流不平衡度为27.28%, 系统不平衡度较大; 正序-负序双环控制下, 系统电流基本维持在17 A左右, 系统电流不平衡度明显降低。可见, 本文所提方法可以有效地解决装置对不平衡负载的补偿问题。

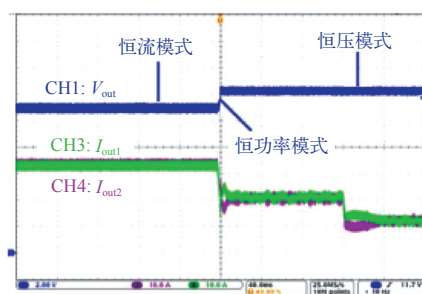
4 结束语

本文在负载不平衡环境下, 建立了链式STATCOM正序、负序数学模型, 提出基于神经元解耦的正序-负序双环控制方法, 通过正负序控制环同时对负载无功及负序分量进行补偿。采用主从控制方案实现控制要求, 主控制器用于实现正序-负序双环控制算法, 控制链式STATCOM对不平衡负载的补偿; 从控制器利用有功电流均等分配来控制直流侧电容电压平衡。仿真和实验结果验证了该方法的正确性与有效性, 具有一定的工程参考价值。

参考文献

- [1] Lee C K, Leung J S K, Hui S Y R, et al. Circuit-level comparison of STATCOM technologies [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18 (4): 1084-1092.
- [2] 李春华, 黄伟雄, 袁志昌, 等. 南方电网 ± 200 Mvar 链式STATCOM系统控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (3): 116-121.
- [3] Chiasson J N, Tolbert L M, McKenzie K J, et al. Elimination of harmonics in a multilevel converter using the theory of symmetric polynomials and resultants [J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2005, 13 (2): 216-223.

(下转第81页)



(b) 过电流恢复

图15 过电流保护波形

4 结束语

本文以LLC半桥谐振变换器作为单模块的主电路拓扑,该结构工作谐振区域时,可以实现一次侧开关管的零电压导通和二次侧二极管的零电流关断,所以系统效率较高。而采用UCD3138内部自带的硬件均流模块,可以提高系统的功率密度和控制的可靠性。实验波形也验证了系统在稳态工作和短路情况下均可实现两模块之间的均流控

制,可见该控制方案的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 高艳青. 现代电力电子及电源技术的发展趋势 [J]. 电脑与电信, 2007 (1): 33-36.
- [2] 勒成梁. 大功率高频并联软开关电源模块研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [3] 江晋宽. 开关电源的技术动向 [J]. 控制工程, 1999 (1): 1-4.
- [4] 潘钢. 数字式LLC谐振变换器及并联均流技术的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [5] 陆治国, 余昌斌. 新型LLC谐振变换器的分析与设计 [J]. 电气应用, 2008, 27 (1): 65-68.
- [6] 吴晓民. 高频开关电源模块均流系统的研究 [J]. 电源世界, 2008 (12): 42-44.
- [7] 张国兵. 大功率开关电源并联技术的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.

(收稿日期: 2016-12-06) **EA**

(上接第64页)

- [4] Horwill C, Totterdell A J, Hanson D J, et al. Commissioning of a 225Mvar SVC incorporating a ± 75 Mvar STATCOM at NGC's 400kV east Claydon substation [C]. Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission, London, UK, IEE, 2001: 232-237.
- [5] 魏文辉, 刘文华, 宋强, 等. 基于逆系统方法有功-无功解耦PWM控制的链式STATCOM动态控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (3): 23-28.
- [6] 许树楷, 宋强, 朱永强, 等. 用于不平衡补偿的变压器隔离型链式D-STATCOM的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (9): 137-143.

- [7] Akagi H, Inoue S, Yoshii T. Control and performance of a transformerless cascade PWM STATCOM with star configuration [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43 (4): 1041-1049.
- [8] Song Qiang, Liu Wenhua. Control of a cascade STATCOM with star configuration under unbalanced conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (1): 45-58.
- [9] EI-Sousy F F M. Robust Wavelet-neural-network sliding-mode control system for permanent magnet synchronous motor drive [J]. IET Electric Power Applications, 2011, 5 (1): 113-132.

(收稿日期: 2017-01-05) **EA**