

基于 TSMC 的柔性分频输电系统变频换流技术研究

易灵芝, 颜志刚, 邓文浪, 刘魏宏, 彭寒梅

(湘潭大学 信息工程学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 将双级矩阵变换器代替传统倍频设备, 采用整流级有零矢量的双空间矢量调制策略和零电流换流方法, 实现柔性分频输电系统新型变频换流站。MATLAB 的仿真结果表明, 本方案能明显提高输电系统的传输效率, 有效降低系统无功功率, 抑制并网电流谐波分量。

关键词: 分频输电系统; TSMC; 双空间矢量调制; 仿真

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2009)05-0060-06

Research of Frequency Converter Technology in Flexible Fractional Frequency Transmission System Based on TSMC

Yi Lingzhi, Yan Zhigang, Deng Wenlang, Liu Weihong, Peng Hanmei

(Institute of Information Engineering, XiangTan University, XiangTan Hunan 411105, China)

Abstract: Replaces AC-DC-AC transformation equipment with Two Stage Matrix Converter (TSMC) in Flexible Fractional Frequency Transmission System (FFFTS). Uses two space vector modulation strategy of rectifier-level zero vector and zero-current commutation technology to achieve a new FFFTS frequency converter station. The simulation under MATLAB environment proves that the solution can improve the efficiency of power transmission, reduce the system reactive power and suppress the grid current harmonic effectively.

Keywords: fractional frequency transmission system; two stage matrix converter; two space vector modulation; simulation

0 引言

双级矩阵变换器 (two stage matrix converter, 简称 TSMC) 除了具有与传统矩阵变换器相同的优良输入/输出性能外, 还有以下优点: 1) 控制策略简化; 2) 输入整流级和输出逆变级采用整流级有零矢量双空间矢量调制策略, 并通过零电流换流实现安全换流^[1-2]。

柔性分频输电系统利用分频降低系统电抗, 可成倍提高系统传输容量, 显著改善系统运行特性, 为远距离、大容量送电提供了一种具有竞争力的方案^[3-6]。采用 TSMC 替代倍频变压器, 作为分频和工频系统之

间的连接装置完成变频和传输能量, 将有效抑制对工频电网的谐波污染^[3-5]。

1 基于 TSMC 柔性分频输电系统结构

基于 TSMC 的柔性分频输电系统结构如图 1 所示, 其中分频电源 (由水轮发电机和升压变压器组成) 发出分频电力, 由输电线路送至末端, 再经 TSMC 组成的变频换流站将分频电力转变为工频电力; 变频换流站是实现柔性分频输电系统的关键, 主要由换流变压器、TSMC 和平波电抗器组成, 完成交-直-交变频

收稿日期: 2009-07-02

基金项目: 教育部全国工程硕士教育课题 (GJW0701), 湖南省教育厅科研基金资助项目 (07C760), 湖南省大学生研究性学习与创新性实验计划项目 (湘教通[2009]320-88)

作者简介: 易灵芝 (1966-), 女, 湖南宁乡人, 湘潭大学教授, 硕士, 主要研究方向为交流调速与电力电子装置, 电力系统自动化, E-mail: ylzwyh@yahoo.com

转换, 其中换流变压器和平波电抗器所起的作用与直流输电中相似。

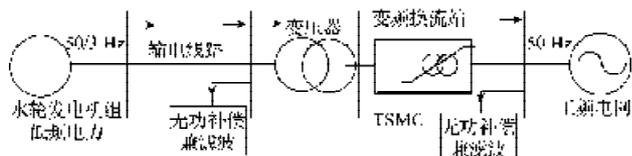


图1 基于TSMC的柔性分频输电系统的结构示意图

Fig. 1 The structure of FFETS based on TSMC

2 基于TSMC的变频换流技术

基于TSMC柔性分频输电系统的变频换流技术主要包括: 主电路拓扑结构、双空间矢量调制策略和零电流换流方法等。

2.1 主电路拓扑结构

TSMC是一种新型绿色矩阵变换器, 不需要或只需要小容量滤波元件, 比传统矩阵变换器拓扑结构更简单^[6-7]。TSMC主电路拓扑结构见图2, 需要12只双向开关(即24只单向开关), 但如果在电路中能保证电压 $U_{PN} > 0$ 始终成立, 则可由18只单向电力电子功率开关来代替, 见图3。通过控制这些开关, 可实现变频和变压功能。

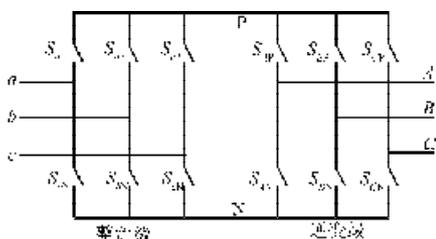


图2 TSMC拓扑结构图

Fig. 2 The topology structure of TSMC

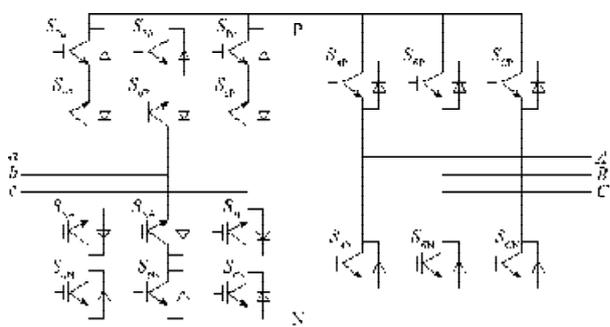


图3 18个单向开关构成的TSMC主电路

Fig. 3 The main circuit of TSMC containing 18 single-direction switches

2.2 零电流换流方法

换流问题是矩阵变换器走向实用的一大障碍, 目前所研究的安全换流方法各有其优缺点^[8]。TSMC在

控制上比传统矩阵变换器更自由, 更灵活, 可避免复杂的换流过程: 1) 逆变级的开关换流直接采用常规直-交逆变器换流方法; 2) 整流级的开关换流, 当逆变级插入零矢量时, 三相输入全部接到直流同一级(P极或N极), 此时直流电流为零, 流经整流级的电流也为零, 整流级开关的换流发生在相邻2时间段的转变时刻, 实现零电流换流。

采用零电流换流策略时, 整流级一个桥臂的开关换流波形如图4所示: 1) 正向导通的功率开关在出现零矢量后考虑开关延时, 然后关断; 2) 当正向功率开关可靠关断后, 负向功率开关开通。这样, 整个换流过程只需2步就能实现, 与传统矩阵变换器的复杂换流方法相比, TSMC零电流换流方法控制策略简单, 既保证了换流的可靠性, 又减少开关损耗, 提高变频换流效率, 在硬件上容易实现。

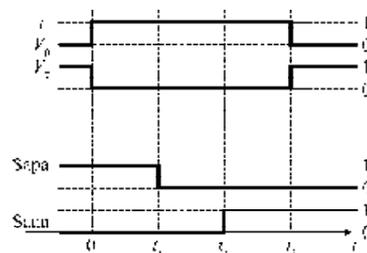


图4 1个桥臂的零电流换流波形

Fig. 4 The waveform of zero-current commutation in an arm

2.3 双空间矢量调制策略

TSMC采用双空间矢量调制策略, 将交-直变换的整流级和直-交变换的逆变级分开, 分别进行空间矢量调制, 然后再合成消除中间虚拟直流环节, 可使变频换流站性能得到较大改善。

目前, TSMC普遍采用的空间矢量调制策略主要有整流级无零矢量和整流级有零矢量2种, 但前者由于整流级取消了零矢量, 整流级调制系数为一时变量, 逆变级调制系数也需在每个开关周期进行调整, 因而在一定程度上增加了控制的复杂度。

整流级有零矢量的双空间矢量调制策略, 具有如下优点^[8-14]: 1) 在理想输入情况下各PWM(pulse width modulation)周期内直流平均电压为一恒值, 从而免去了逆变级调制系数的修正, 简化了逆变级的调制, 在对逆变级进行闭环控制的场合, 这种简化具有重要的意义; 2) 输入功率因数角可调; 3) 双空间矢量调制原理与传统矩阵变换器相同, 但TSMC开关电路无须采用传统矩阵变换器的4步换流技术, 整流级开关的零电流换流仍然可以实现。假设TSMC的输入三相电压为:

$$\begin{cases} u_a = U_{in} \cos(\theta_a) = U_{in} \cos(\omega_i t), \\ u_b = U_{in} \cos(\theta_b) = U_{in} \cos\left(\omega_i t - \frac{2}{3}\pi\right), \\ u_c = U_{in} \cos(\theta_c) = U_{in} \cos\left(\omega_i t + \frac{2}{3}\pi\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\theta_a, \theta_b, \theta_c$ 分别为三相输入电压的瞬时相位；
 ω_i 为输入角频率；
 U_{in} 为输入电压峰值。

TSMC 的空间矢量调制分为整流级的调制和逆变级调制，下面分别进行说明。

2.3.1 整流级有零矢量的空间矢量调制原理

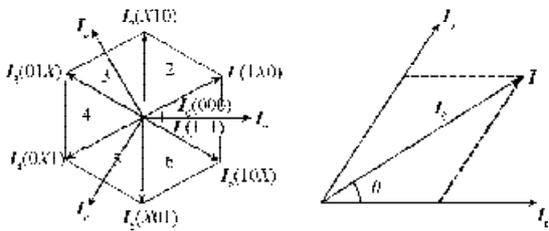
整流级 6 只双向开关可合成 6 个输入电流有效空间矢量 $I_1 \sim I_6$ 和 2 个零矢量，如图 5 中 a) 所示，a) 中括号里的数字按顺序分别代表 a、b、c 三相桥臂上下开关通断状态，“1”表示同直流 p 极相连的开关导通，“0”表示同直流 N 极相连的开关导通，“X”表示所在相上下开关全部处于断开状态。例如：“1X0”表示 a 相与 p 极相连的开关导通，c 相与 N 极相连的开关导通，其余开关处于关断状态。当整流级一相桥臂上下开关导通，另两相桥臂开关全关断时，输入电流矢量为零矢量，整流级输出直流电压为 0。

设 I 为参考输入电流矢量，可由其所在扇区相邻的 2 个有效空间矢量 I_{α} 、 I_{β} 及零状态矢量 I_0 合成，如图 5 中 b) 所示，设 d_{α} 、 d_{β} 、 d_0 分别为 I_{α} 、 I_{β} 、 I_0 的开关占空比，则有：

$$I = d_{\alpha} I_{\alpha} + d_{\beta} I_{\beta} + d_0 I_0 \quad (2)$$

$$\begin{cases} d_{\alpha} = \tau_{\alpha} / T_s = m_c \sin(60^\circ - \theta_c), \\ d_{\beta} = \tau_{\beta} / T_s = m_c \sin \theta_c, \\ d_{0c} = 1 - d_{\alpha} - d_{\beta} \end{cases} \quad (3)$$

式中： m_c 为电流调制系数，且 $0 \leq m_c \leq 1$ ；
 T_s 为开关周期。



a) 输入电流有效空间矢量 b) 输入电流矢量合成

图 5 TSMC 整流级空间矢量调制

Fig. 5 Space vector modulation of rectifier in TSMC

2.3.2 逆变级的空间矢量调制原理

逆变级部分的调制如图 6 所示，逆变电路 6 只双向开关同样可合成 6 个有效空间矢量 ($U_1 \sim U_6$) 和 2 个零矢量。图 6 中 a) 括号里的数字含义与图 5 中 a) 说明相同，例：“100”表示 a 相与 p 极相连的开关导通，b、c

两相与 N 极相连的开关导通，其余开关处于关断状态。

U_{oi} 为参考输出电压矢量，它由所处扇区的 2 个相邻有效空间矢量 U_M 、 U_N 及零状态矢量 U_0 合成，如图 6 中 b) 所示，设 d_M 、 d_N 、 d_{0V} 分别为 U_M 、 U_N 、 U_0 的开关占空比，则

$$U_{oi} = d_M U_M + d_N U_N + d_{0V} U_0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} d_M = m_v \sin(60^\circ - \theta_v), \\ d_N = m_v \sin \theta_v, \\ d_{0V} = 1 - d_M - d_N \end{cases} \quad (5)$$

式中： m_v 为调制系数，且 $0 \leq m_v \leq 1$ 。

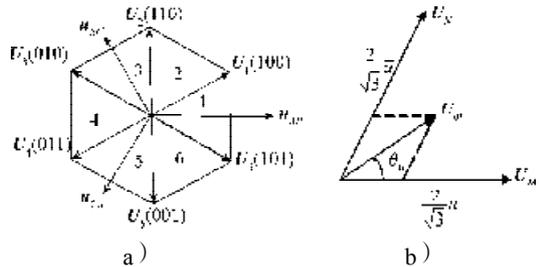


图 6 TSMC 逆变级空间矢量调制

Fig. 6 Space vector modulation of inverter in TSMC

2.3.3 交-直-交双级矩阵变换器的控制策略

由于 1 个 PWM 周期内整流级在 2 时间段内给逆变级提供的直流电压不同，因而逆变级的调制在 2 时间段内分别进行，为了充分利用 2 级电压，应该在 1 个调制周期内保证输出矢量相位角不变，因此 2 时间段采用的占空比相同。设要合成的参考输入电流矢量处于第 1 扇区，则整流级与逆变级开关的协调控制如图 7 所示，其中整流级相邻矢量 I_6 和 I_1 对应的开关状态产生的瞬时整流输出电压分别为输入线电压 u_{ab} 和 u_{ac} ，而在零矢量作用下输出零矢量，如图 7 中 a) 所示。TSMC 逆变级空间矢量调制与常规逆变器空间矢量调制不同，需在 2 级电压下分别进行，如图 7 中 b) 所示，1 个 PWM 周期内每级电压下采用相同的 2 个有效空间矢量，同一个有效矢量在不同的直流电压下的占空比相同。如果将逆变级的零电压矢量分配在整流级开关的切换处，就可以实现整流级开关的零电流换流，其对应的开关矢量顺序见图 7 中 c) 所示。

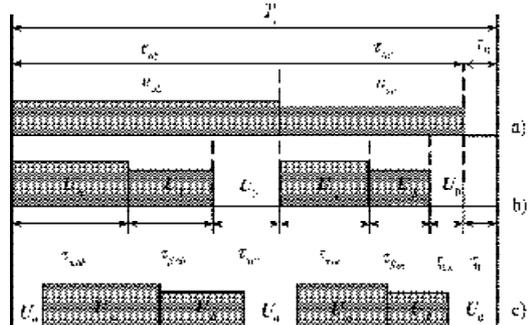


图 7 1 个 PWM 周期的开关调制过程

Fig. 7 Switching modulation of a PWM period

3 基于双级矩阵变频器的柔性分频输电系统变频换流仿真实现

3.1 仿真模型

在 MATLAB/Simulink 交互式仿真集成环境下, 配合电力系统专业工具箱 Power System Blockset (简称 PSB) 及其它相关工具箱^[5], 搭建了基于 TSMC 的柔性分频输电系统变频换流仿真模型, 主要由分频电源 (50/3 HZ, AC POWER)、工频系统 (50 HZ, AC POWER)、输电线路 (RLC1)、变频换流站、以及信号的测量与分析模块组成, 见图 8。

变频换流站的换流变压器和平波电抗器可由设置 PSB 工具箱得到。在实现 TSMC 变换时, 双向开关由 2 个绝缘三双极型功率管 IGBT (insulated gate bipolar transistor) 和 2 个二极管反并联而成, 单向开关由 1 个 IGBT 和 1 个二极管反并联而成, 将 1 个双向开关、3 个单向开关封装成单相矩阵开关, 然后将 3 个单相矩阵开关连接成三相矩阵开关。双空间矢量调制控制策

略的功能实现是由 2 个 MATLAB 的 M 文件形式的 S 函数 CONTROL 和 PWM 完成, 它们产生 2 组触发信号 g_1 、 g_2 分别控制整流级和逆变级功率开关的通/断, 采用零电流换流法来实现双向开关的安全换流。

3.2 参数设置

分频电源采用理想电源, 线电压有效值为 500 kV, 频率为 50/3 Hz, 相角可以调节, 以便实现输送不同功率的情况。电源内部等值阻抗 $R=0.24 \Omega$, $L=0.16 \text{ H}$ 。

输电线路采用 3 段 π 型等值电路模型, 其模拟电压等级为 500 kV、长度为 1 200 km 的输电线路。线路参数参照大截面耐热导线 TACSR810 mm² × 4 型, 线路单位电阻、电容和电感分别为 0.009 72 Ω/km 、0.008 68 H/km、0.012 90 $\mu\text{F}/\text{km}$ 。

TSMC 变频换流站: 换流变压器额定容量为 3 000 MVA, Y_0/Δ 型联接, 平波电抗器电感 $L=0.2 \text{ H}$ 。滤波装置设为 RLC 串联结构, 兼起无功补偿作用。设工频系统为无穷大系统, 用理想电源等效, 其输出频率设为 50 Hz, 线电压有效值为 220 kV。

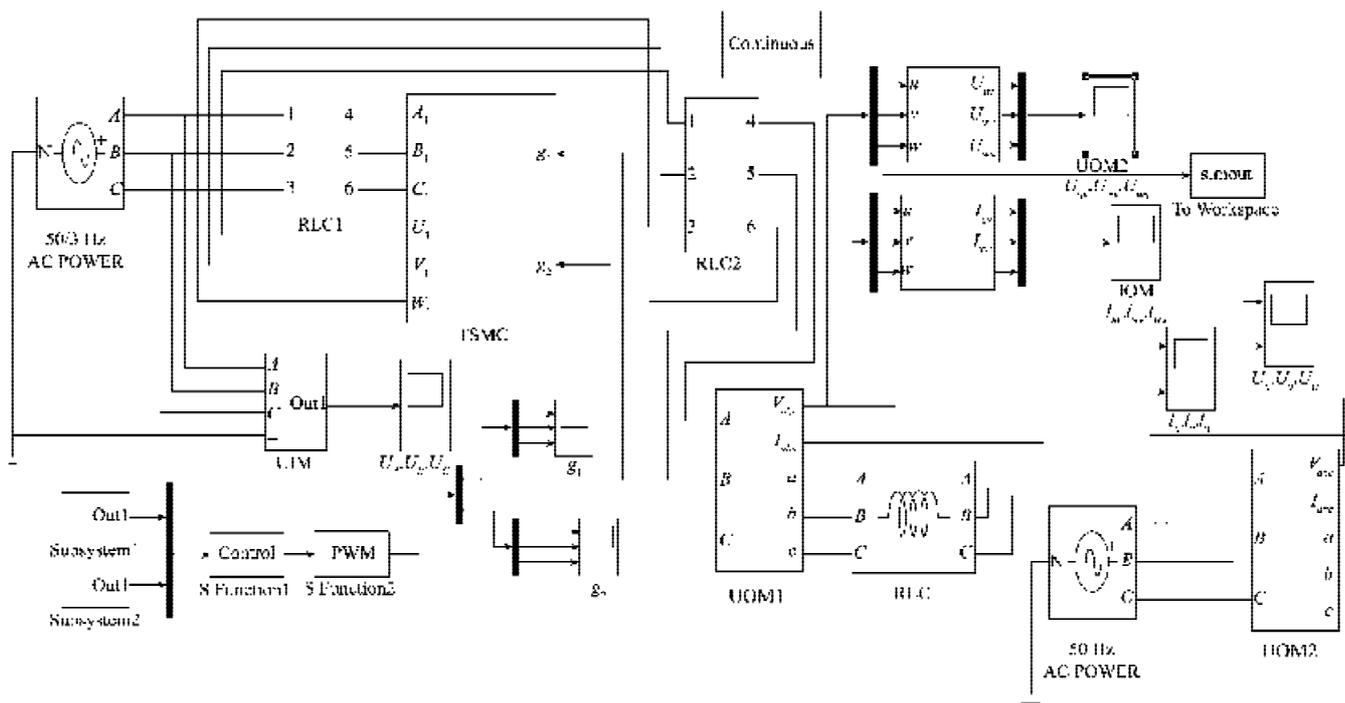


图 8 基于 TSMC 的柔性分频输电系统变频换流仿真模型

Fig. 8 Simulation model of FFTS frequency conversion based on TSMC

3.3 仿真结果分析

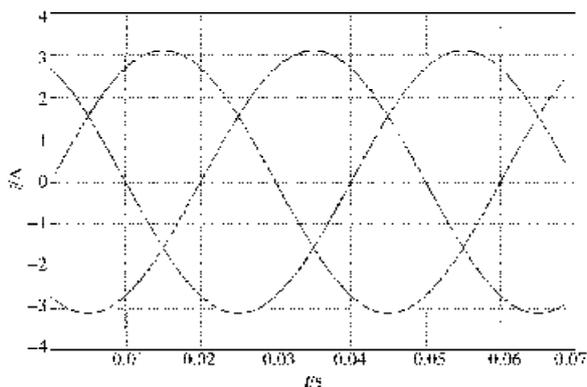
利用搭建好的系统仿真模型, 在给定的各元件参数和边界条件下, 对分频输电系统进行了仿真实验, 稳态运行时各主要节点的仿真结果如图 9 所示。

低频电源发出的低频电力, 低频发电机的输出三相电流波形见图 9 中 a), 经过输电线路后得到的电压、电流, 由于线路损耗, 幅值有所降低, 且发生了畸变, TSMC 变频换流站的三相输入电流波形见图 9 中 b), 将

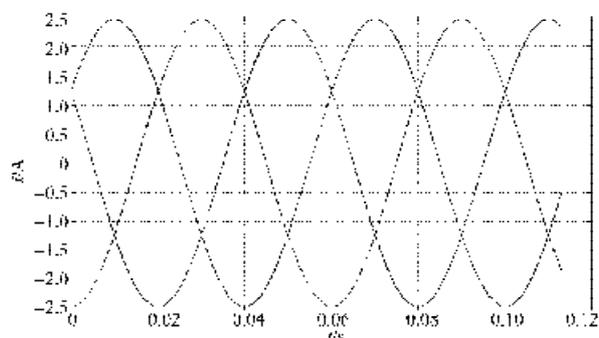
此电压和电流送入 TSMC, 经过变频换流处理后, 输出电流波形较好地接近正弦曲线, 电流畸变小, 如图 9 中 c) 所示。

为了更好地看到 TSMC 的“绿色”变换优势, 仿真模型设置傅立叶分析器, 对基于 TSMC 的柔性分频输电系统变频换流站输出的 A 相相电流进行频谱分析, 从图 9 中 d) 频谱图可看出, 在设定的特定运行方式下, 换流站工频电流的谐波含量很小, 畸变率 THD

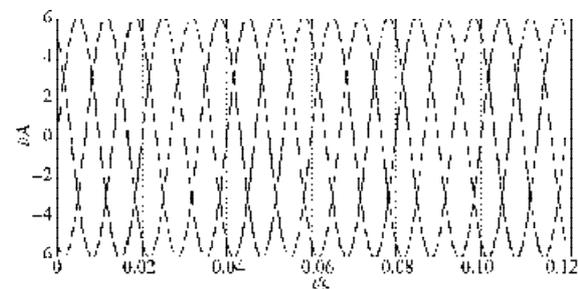
值很小,为0.58%,并可通过加装滤波器进行抑制^[4],从而提高输出电能质量。



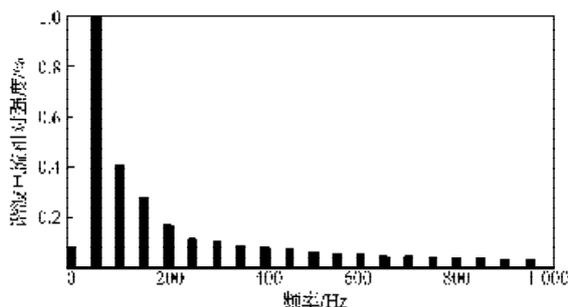
a) 低频发电机的三相输出电流波形



b) TSMC变频换流站的三相输入电流波形



c) TSMC工频侧三相输出电流 i_u 、 i_v 、 i_w 波形



d) TSMC工频侧输出A相电流 i_u 频谱图

图9 TSMC变频换流站仿真结果

Fig. 9 Simulation results of FFTS frequency conversion station based on TSMC

4 结语

TSMC是一种新型的绿色变换器,集交-直-交变换器和矩阵变换器的优点于一身。在柔性分频输电系

统中采用TSMC替代倍频变压器,实现新型变频换流,能提高系统的传输效率、解决谐波和无功等问题,同时也较好地解决了远距离、大容量输电存在的问题。

参考文献:

- [1] 张森林,王锡凡.基于矩阵式交-交变频的柔性分频输电系统仿真[J].西安理工大学学报,2004,20(4):416-419.
Zhang Senlin, Wang Xifan. Flexible Fractional Frequency Transmission System Simulation Based on Matrix Converter [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2004, 20(4): 416-419.
- [2] Liu Yong, Yi Lingzhi, Zhao Xiaoyun. Control of Brushless Doubly-Fed Machine for Wind Power Generation Based on Two-Stage Matrix Converter[C]//The 11th International Conference on Electrical Machines and Systems. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2008: 199-204.
- [3] 周小谦.我国西电东送的历史、规划与实施[J].电网技术,2003,27(5):1-5.
Zhou Xiaoqian. Development, Planning and Implementation of the Project of Power Transmission from West China to East China[J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 1-5.
- [4] 胡超凡,王锡凡,曹成军,等.柔性分频输电系统的可行性研究[J].高电压技术,2002,28(3):16-18.
Hu Chaofan, Wang Xifan, Cao Chengjun, et al. Feasibility Research of Flexible Fractional Frequency Transmission System[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(3): 16-18.
- [5] 何大愚.柔性交流输电系统技术的发展要求其定义更新[J].电力自动化设备,2004(10):36-39.
He Dayu. Development of Flexible AC Transmission & Distribution System Technology Requires Definition Renewing [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004(10): 36-39.
- [6] 刘魏宏,朱建林,邓文浪,等.基于交-直-交型矩阵变换器的多驱动系统的控制策略[J].中国电机工程学报,2006,26(6):55-59.
Liu Weihong, Zhu Jianlin, Deng Wenlang, et al. Control Strategy of Multi-Drive System Based on AC-DC-AC Matrix Converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 55-59.
- [7] 粟梅,许新东,李丹云,等.双级矩阵变换器驱动异步电动机的特性分析[J].中南大学学报:自然科学版,2005(4):658-663.
Su Mei, Xu Xindong, Li Danyun, et al. Performance Analysis of Two-Stage Matrix Converter Driven Asynchronous Motor [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005(4): 658-663.
- [8] 朱建林,陈才学,易灵芝,等.基于矩阵变换器的异步电机直接转矩控制[J].电气传动,2007,37(8):20-25.
Zhu Jianlin, Chen Caixue, Yi Lingzhi, et al. Direct Torque Control of Induction Motor Fed by Matrix Converter[J].

- Electric Drive, 2007, 37(8): 20-25.
- [9] Wei L, Lipo T A. Matrix Converter Topologies with Reduced Number of Switches[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2003(7): 675-680.
- [10] Baus M, Lemme M C, Chmielus St, et al. Fabrication of Monolithic Bi-Directional Switch Devices[J]. Microelec-Tronic Engineering, 2004(73-74): 463-467.
- [11] 邓文浪, 杨欣荣, 朱建林, 等. 非正常输入情况下双级矩阵变换器调制策略的改进[J]. 电工技术学报, 2007(1): 100-106.
Deng Wenlang, Yang Xinrong, Zhu Jianlin, et al. Improvement of Modulation Strategy for Two-Stage Matrix Converter under Abnormal Input Voltages[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007(1): 100-106.
- [12] 邓文浪, 杨欣荣, 朱建林, 等. 改进矩阵变换器在输入电压非正常情况下的调制策略[J]. 控制与决策, 2006, 21(8): 908-911.
Deng Wenlang, Yang Xinrong, Zhu Jianlin, et al. Improvement of Modulation Strategy for Matrix Converter under Abnormal Input Voltages[J]. Control and Decision, 2006, 21(8): 908-911.
- [13] Clumpner C, Blaabjerg F. Two-Stage Matrix Converter An Alternative to the Matrix Converter[C]//IEEE Professional Networks on Power Conversion and Applications. London: [s.n.], 2003: 61-69.
- [14] Klumpner C, Blaabjerg F. A New Cost-Effective Multi-Drive Solution Based on A Two-Stage Direct Power Electronic Conversion Topology[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2003(3): 86-92.
- [15] 姚俊, 马松辉. Simulink 建模与仿真[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
Yao Jun, Ma Songhui. The Simulation and Modeling Based on Simulink[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 2002.

(责任编辑: 李玉珍)

(上接第54页)

4 结论

通过 MATLAB 仿真对所提出的光伏阵列模型和基于 S- 函数的最大功率追踪控制策略进行了验证。从仿真结果来看, 采用本文中的光伏阵列模型和基于 S- 函数的最大功率追踪控制策略能满足各项技术要求。

参考文献:

- [1] 朱世宏, 温馨, 杨文君. 后石油时代我国可再生能源发展对策[J]. 西南石油大学学报: 社会科学版, 2009, 2(1): 1-5.
Zhu Shihong, Wen Xin, Yang Wenjun. China's Development Counter-Measures for Renewable Energy in the Post-Oil Time [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Social Sciences Edition, 2009, 2(1): 1-5.
- [2] 狄丹. 太阳能光伏发电是理想的可再生能源[J]. 华中电力, 2008, 21(5): 59-62.
Di Dan. Photo-Voltaic Power Is One of the Best Renewable Energies[J]. Central China Electric Power, 2008, 21(5): 59-62.
- [3] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 MATLAB 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
Mao Meiqin, Yu Shijie, Su Jianhui. Versatile Matlab Simulation Model for Photovoltaic Array with MPPT Function [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [4] 邹晓. 光伏并网逆变器及其控制研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2008.
Zou Xiao. Study on PV Grid-Connected Inverter and Its Control[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2008.
- [5] 黄俊, 王兆安. 电力电子变流技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
Huang Jun, Wang Zhaoan. Power Electronic Conversion Techniques[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [6] 杜琳. 基于输出参数的光伏系统最大功率点跟踪控制的研究与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
Du Lin. Reserch and Implementation of Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Contol Based on Output Parameters [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [7] Wang Genping, Yi Lingzhi, Zou Xiao, et al. The Design of Constant Frequency Hysteresis Current Controller with Voltage Space Vector in PV Grid-Connected Inverter[EB/OL]. [2008-12-09]. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4699155.
- [8] 李国勇, 谢克明. 控制系统数字仿真与 CAD[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
Li Guoyong, Xie Keming. Control System Digital Simulation and CAD[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [9] 阔永红. 数字信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
Kuo Yonghong. Digital Signal Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.

(责任编辑: 李玉珍)