

# 超级电容和蓄电池混合储能系统的 THIPWM 算法研究

陈珊珊, 马建伟

(河南科技大学电子信息工程学院, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 针对超级电容和蓄电池混合储能系统的动态性能较差, 输出交流电压波形失真严重的问题, 提出了一种采用三倍频谱波注入的脉宽调制(THIPWM)法。利用三电平逆变器的优良性能改善系统的动态性能, 对蓄电池和超级电容两端直流输出电压、直流侧总电流进行采样, 解决三电平逆变器中性线电压不平衡的问题, 实现了超级电容与蓄电池在运行过程中的平滑控制, 减少了最终输出波形的畸变指数。用 Matlab 搭建出仿真模型, 证明所提出的含三电平逆变器的拓扑结构及其控制算法的实用性和正确性。

**关键词:** 谐波; 微电网; 三电平逆变器; 混合储能; 电压不平衡; THIPWM

## Research of super capacitor and battery hybrid energy storage system with the THIPWM

CHEN Shan-shan, MA Jian-wei

(School of Electronic and Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** It is considered that the dynamic performance of super capacitor and battery hybrid energy storage system is poor and the output waveform of AC voltage distorts seriously. The third harmonic injection PWM (THIPWM) with the three-level inverter, which has an excellent performance to improve the dynamic performance of the super capacitor and battery, gathers information from ends of the DC output voltage or current and the total current of the DC side to solve the problem of unbalanced neutral line voltage of three-level inverter. It also keeps super capacitor and battery controlled smoothly during the operation, and reduces the final output waveform distortion index. The Matlab simulation model is established and the results verify the practicality and correctness of the three-level inverter topology and its control algorithm.

**Key words:** harmonic; microgrid; three-level inverter; hybrid energy storage; voltage unbalance; THIPWM

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0111-05

## 0 引言

随着微网技术的发展, 单一储能装置已经不能满足用户的需求, 混合储能将会成为今后研究的热点<sup>[1-3]</sup>。而电力电子技术的快速发展, 使多电平逆变器获得更高的功率密度、更高的效率、更高的静态和动态性能。

混合储能系统控制要求很高, 既要保证微网两种模式下的稳定运行, 又要保证两种储能装置的平滑控制, 因此经常出现电压波形失真、动态性能较差的问题。基于此本文提出了一种三倍频谱波注入的脉宽调制(THIPWM)法<sup>[4-6]</sup>, 同时在电路使用三电平逆变器代替传统的 DC/AC 变流器, 进一步改善系统的性能指标和输出电压波形。常见的三电平逆变器的控制算法有采用零序电压注入和空间矢量调制(SVM)的 PWM 法<sup>[7-9]</sup>。但是, 在调制比为固定值

时, 它们的直流电压利用率很低, 且输出电压存在较大波动, 而 THIPWM 构成相电压调制波, 可有效地提高直流电压的利用率, 减小输出电压波动<sup>[4,10]</sup>。三次谐波注入的脉宽调制(THIPWM)法, 是在相电压正弦调制波中叠加适当大小的 3 的整数倍次谐波, 经过调制后逆变器输出相电压中包含的这些谐波成分, 它们的相位相同, 故在合成线电压时, 各相电压中的三次谐波成分相互抵消, 线电压仍为正弦波<sup>[5-6,11-12]</sup>, 因此克服了传统谐波注入时谐波成分残留在 PWM 波中, 降低谐波品质的问题。

本文对蓄电池和超级电容两端直流输出电压、直流侧总电流进行采样, 孤网模式下使用  $U/I$  控制, 并网模式下使用  $P/Q$  控制, 计算出控制 PWM 开关信号的电压电流值, 并通过仿真验证了所提出的混合储能结构及其控制策略能够在微网系统两种模式下运行时, 实现蓄电池和超级电容之间的平滑

控制,减小输出电压波动,从而满足微网运行需求。

## 1 系统结构

由可再生能源发电单元和储能装置构成的智能微电网如图 1 所示。状态开关负责微网并网/孤网运行两种模式的切换。发电单元负责发电,混合储能装置包括超级电容储能和蓄电池储能。

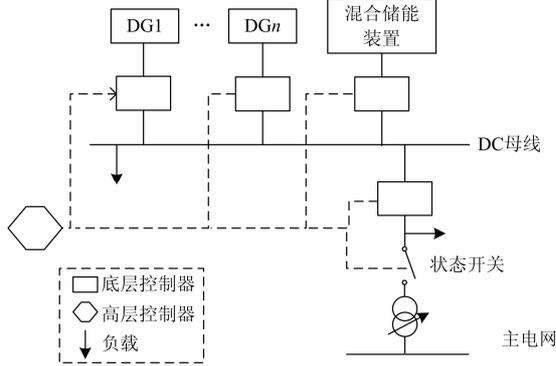


图 1 系统模型图

Fig. 1 System model

## 2 控制算法

### 2.1 拓扑结构

蓄电池与超级电容器混合储能结构如图 2。混合储能装置作为三电平逆变器的电压源,直接与三电平逆变器相连,三电平逆变器把直流电转化为交流电,跟二电平逆变器相比,可以减少开关器件的损耗,减少交流侧谐波污染,改善静态与动态性能<sup>[7-8]</sup>,电容器起到滤波的作用。

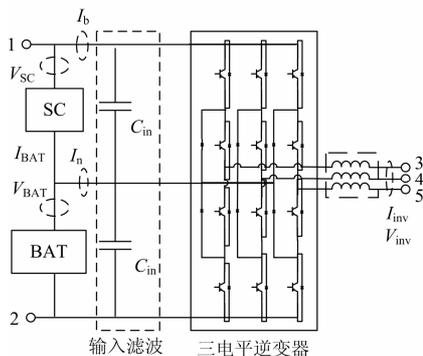


图 2 三电平整流器的拓扑结构

Fig. 2 Topology with 3-level inverter

### 2.2 控制算法

微电网有并网运行和孤网运行两种工作方式,因此所设计的控制算法必须满足这两种工作方式的需要。

如图,开关  $u$ 、 $u_p$  置于 1 位置时,系统工作在

孤网模式下,逆变器采用  $U/f$  控制,将采集到的交流电压进行矢量变换,求得两相旋转坐标系下的  $V_d$ 、 $V_q$ 。控制算法含有两个循环:内循环为电流循环,外循环为电压循环。最后结果送入 THIPWM 中,输出转换信号  $d_{abc}$ 。

开关  $u$ 、 $u_p$  置于 2 位置时,系统工作在并网模式下,逆变器采用  $P/Q$  控制,将采集到的电压、电流信号进行矢量变化,求出两相旋转坐标系下的有功、无功功率。最后也将结果送入 THIPWM 中,输出转换信号  $d_{abc}$ 。

载波为等腰三角波,通过对蓄电池和超级电容两端直流输出电压电流、直流侧总电流进行采样,计算参考电流  $i_{BAT}^*$ ,与  $i_{BAT}$  比较后经过 PI 控制器,求出调制波与载波在时间坐标上的交点,控制三电平逆变器发出“通”和“断”的指令信号,控制三电平逆变器开关器件的 27 种状态<sup>[13]</sup>。

在相电压中注入倍频谱谐波,注入方法为

$$F_1(\omega t) = 1.1547\sin(\omega t) + 0.1962\sin(3\omega t) + 0.0253\sin(9\omega t) - 0.0162\sin(15\omega t) \quad (1)$$

其具体构造方法是对三相标准正弦波  $u_{an}$ 、 $u_{bn}$  和  $u_{cn}$  进行如下合成:

$$u_n = -\frac{\max(u_{an}, u_{bn}, u_{cn}) + \min(u_{an}, u_{bn}, u_{cn})}{2} \quad (2)$$

将  $u_n$  作为注入谐波叠加到三相调制波中,即

$$\begin{aligned} u_a &= u_{an} + u_n \\ u_b &= u_{bn} + u_n \\ u_c &= u_{cn} + u_n \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $u_a$ 、 $u_b$  和  $u_c$  就是合成的倍频谱注入谐波。对式(2)进行傅里叶分解,取到第 15 次谐波,就得到与式(1)完全相同的表达式。而式(2)、式(3)则为三倍频谱谐波的完整形式,其他形式都是该形式在某种程度上的近似。

由图 2 得到直流母线端电压  $V_{12}$  为

$$V_{12} = V_{sc} + V_{BAT} \quad (4)$$

直流侧总功率  $P_{dc}$  为

$$P_{dc} = V_{sc} \cdot I_b + V_{BAT} \cdot I_{BAT} - V_{BAT} \cdot I_n \quad (5)$$

低通滤波器根据频率将系统的功率变化分为两部分。低频部分由 BAT 吸收/提供,高频部分由 SC 吸收/提供,假设低通滤波器滤除后的总功率变为  $P_{dc}^*$ , 求出电流偏差  $\Delta I_{BAT}$  为

$$\Delta I_{BAT} = I_{BAT}^* - I_{BAT} = \frac{P_{dc}^*}{V_{BAT}} - I_{BAT} \quad (6)$$

送入 PI 调节器进行调节, 为了控制  $\Delta I_{BAT}$  的电

流大小, 给调制信号加入了偏移量限制模块。从而得到三电平逆变器控制算法如图 3。

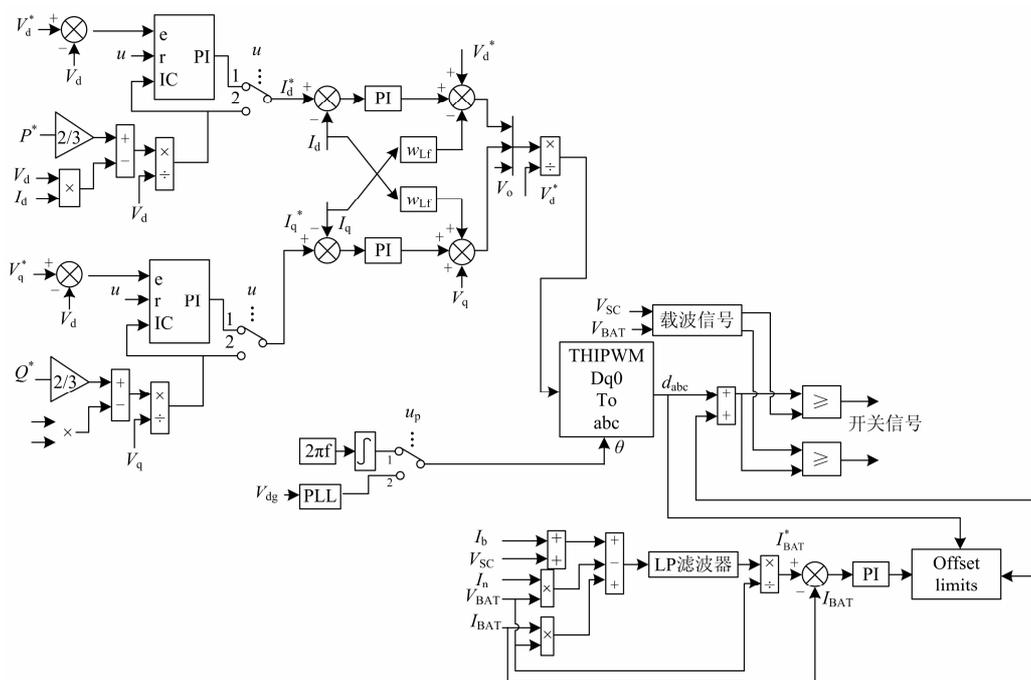


图 3 三电平逆变器控制算法

Fig. 3 Control algorithm with 3-level inverter

### 3 仿真分析

图 4 为系统仿真图, 发电单元在此作为一个可变直流电源, 直接给直流总线供电。混合储能装置和三电平逆变器将直流电变为交流电, 并具有平滑控制的作用。状态开关控制微电网的运行模式——并网或者孤网运行。因此系统中含有两个负载, 主负载和微网相连, 副负载和大电网相连。

仿真参数如下: 混合储能逆变器容量 15 kVA(蓄电池容量 100 A·h, 额定电压 240 V; 超级电容器电容 15 F, 额定电压 360 V), 负荷有功功率 15 kW、无功功率 20 kvar。  $R_{line}=7.6 \text{ m}\Omega$ ,  $R_{road}=15 \text{ }\Omega$ ,  $L_{line}=66.53 \text{ }\mu\text{H}$ ,  $C_{in}=10 \text{ mF}$ 。

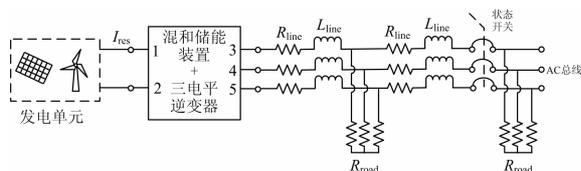


图 4 系统仿真图

Fig. 4 System simulation

直流母线总电压的仿真结果见图 5 (图中 0 表示状态开关闭合瞬间) 可以看出与 SVM 算法相比, THIPWM 算法具有更快的响应速度、更小的稳态误

差和更好的稳定性。

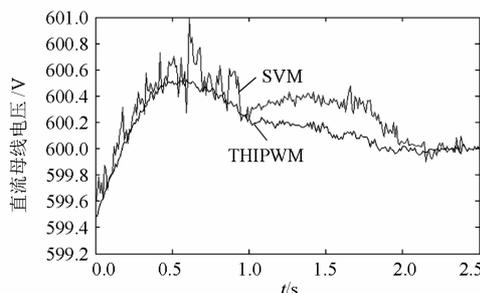


图 5 直流母线总暂态仿真结果对比图

Fig. 5 Comparison of the DC bus transient simulation results between two control algorithms

SVM-PWM 的波形畸变率为 3.68%~4.96%, THIPWM 的波形畸变率为 2.39%~3.57%。

图 6 为使用 SVM 算法输出的三相电压波形仿真图, 图 7 为使用 THIPWM 算法输出的三相电压波形仿真图。对比之后可看出系统的输出电压波动减少。可见 THIPWM 在谐波滤除、改善电能质量上的效果比 SVM 更好。

图 8 和图 9 分别表示 SC 侧和 BAT 侧从主网分离时能量存储单元的电流变化情况。从中可以看出, 当脱离主网瞬间, 两个逆变器的电流都相应增加, 导致直流母线电压减少, 然而, SC 侧的逆变器, 在

直流总线电压变化时快速反应, 给直流总线注入一个大的峰值电流, BAT 侧无明显变化(图 8 上方线)。可证明, SC 可快速应对直流母线的突发状况。干扰消除后, BAT 侧输出电流增加, 以便给新的负载供电。但是, 从图中可清楚地看到, 跟使用 THIPWM 算法相比, 使用 SVM 算法的电流有更大的波动。

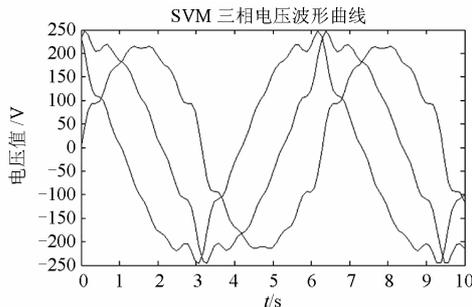


图 6 使用 SVM 算法电压波形曲线  
Fig. 6 Voltage waveform using SVM

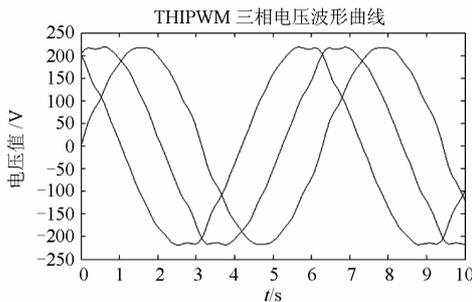


图 7 使用 THIPWM 算法电压波形曲线  
Fig. 7 Voltage waveform using THIPWM

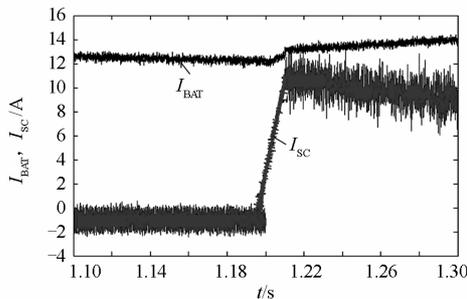


图 8 能量单元电流变化情况  
Fig. 8 Current waveform of SVM

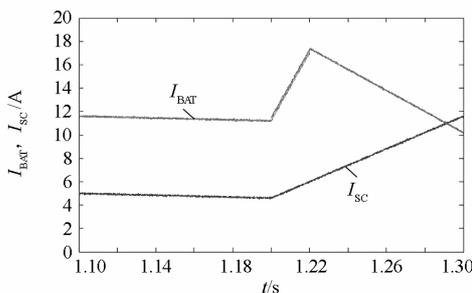


图 9 能量单元电流变化情况  
Fig. 9 Current waveform of THIPWM

## 4 总结

混合储能已经逐渐代替单一的储能方式成为微网系统的一部分。混合储能装置的使用除了传统优点外, 还结合了两种储能装置的优点, 实现了性能的互补, 然而, 要想实现微网系统的平稳运行, 我们必须把微网系统两种运行模式和混合储能的平滑控制结合在一起考虑, 因此, 本文提出了三倍频谱谐波注入的 PWM 法, 采用电压-电流双闭环控制, 为了尽量减少谐波, 提高直流母线电压利用率和动态性能, 又使用了三电平逆变器, 同时提高了系统的稳态和暂态性能。仿真和实验结果表明, 本文所提出的控制算法能够充分满足超级电容器和蓄电池运行过程中的平滑控制, 同时也能满足微网运行模式切换过程中对储能的需要。

## 参考文献

- [1] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152.  
ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A survey of energy storage technology for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.
- [2] 周念成, 闰立伟, 王强钢. 光伏发电在微电网中接入及动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 119-127.  
ZHOU Nian-cheng, YAN Li-wei, WANG Qiang-gang. Research on dynamic characteristic and integration of photovoltaic generation in microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 119-127.
- [3] 张野, 郭力, 贾宏杰, 等. 基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 36-41.  
ZHANG Ye, GUO Li, JIA Hong-jie, et al. An energy management method of hybrid energy storage system based on smoothing control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 36-41.
- [4] Etxeberria A, Vechiu I, Camblong H, et al. Comparison of three topologies and controls of a hybrid energy storage system for microgrids[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 54: 113-121.
- [5] Sabri M F M, Husin M H, Othman I N. Development of 5-bit, 4-inputs PWM generator on FPGA through VHDL programming[C] // International Conference on Advances Science and Contemporary Engineering 2012, Procedia Engineering 50, 2012: 486-493.

- [6] ZHAO Guo-peng, HAN Min-xiao. DC voltage design and corresponding compensation performance analysis of static var generator[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2012, 43: 501-503.
- [7] 宋文胜, 冯晓云. 基于零序电压分量注入的单相三电平 NPC 整流器脉宽调制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(36): 16-24.  
SONG Wen-sheng, FENG Xiao-yun. A pulse width modulation scheme with zero-sequence voltage injection for single phase three-level NPC rectifier[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(36): 16-24.
- [8] 饶建业, 李永东. 带储能单元的新型多电平逆变器及其控制算法[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(7): 103-109.  
RAO Jian-ye, LI Yong-dong. Control strategies of a new hybrid multilevel inverter with energy storage[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(7): 103-109.
- [9] 胡存刚, 王群京, 李国丽, 等. 基于虚拟空间矢量的三电平 NPC 逆变器中点电压平衡控制方法[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(5): 100-107.  
HU Cun-gang, WANG Qun-jing, LI Guo-li, et al. A neutral-point potential balancing algorithm for three-level inverter based on virtual-space-vector[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(5): 100-107.
- [10] 孙孝峰, 顾和荣, 王立乔, 等. 高频开关型逆变器及其并网技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 95-96.  
SUN Xiao-feng, GU He-rong, WANG Li-qiao, et al. *High frequency switching inverter and the grid*[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 95-96.
- [11] 刘方锐, 段善旭, 康勇, 等. 多机光伏并网逆变器的孤岛检测技术[J]. *电工技术学报*, 2010, 25(1): 167-171.  
LIU Fang-rui, DUAN Shan-xu, KANG Yong, et al. Islanding detection methods for multiple PV converters system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010, 25(1): 167-171.
- [12] 郭珂, 曾意, 刘强, 等. LCL 滤波器在具有有源滤波功能的光伏并网系统中的应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(3): 73-79.  
GUO Ke, ZENG Yi, LIU Qiang, et al. Application of LCL-filter in photovoltaic grid-connected system with active power filter function[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(3): 73-79.
- [13] 窦真兰, 张同庄, 凌禹. 三电平 NPC 整流器空间矢量脉宽调制及中点电位平衡控制[J]. *电力自动化设备*, 2008, 28(2): 65-79.  
DOU Zhen-lan, ZHANG Tong-zhuang, LING Yu. SVPWM and neutral-point-potential balance control of three-level NPC rectifier[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2008, 28(2): 65-79.

---

收稿日期: 2013-04-24; 修回日期: 2013-05-31

作者简介:

陈珊珊(1988-), 女, 硕士研究生, 主要从事谐波治理, 微网控制等方面的研究; E-mail: 494876816@qq.com

马建伟(1965-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究领域为多变量控制理论、光电工程与工业自动化装置研究与开发。