

基于空间矢量切换的三电平逆变器中性点电位平衡策略

石新春, 李光辉, 付超, 周国梁

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 中性点电位平衡问题是三电平逆变器在应用过程中需要考虑的一个重要问题, 中性点电位不平衡不仅会增加功率开关器件的电压应力, 并且在有源逆变的应用场合会造成逆变失败。首先建立三电平逆变器的数学模型, 详细分析了空间矢量脉宽调制的特性和中性点电位失衡的原因, 在此基础上研究了一种基于空间矢量切换技术的中性点电位平衡策略, 根据实时直流电容电压和交流电流, 通过正负小矢量进行等效切换完成对当前 PWM 信号的修正, 从而实现中性点电位达到平衡状态, 仿真结果验证了该方法的正确性。

关键词: 三电平逆变器; 中性点电位平衡; 矢量切换

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0065-04

Neutral Point Potential Balance Method of Three-level Inverter Based on Space-vector Switching

SHI Xin-chun, LI Guang-hui, FU Chao, ZHOU Guo-liang

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Neutral point potential balance is an important problem in design of three-level inverter, the imbalance of neutral point potential not only increases voltage stress of power device, but also results in inversion failure in the active inversion situation. In this paper, a mathematical model of three-level inverter is presented, and the theory of the space-vector pulse-width modulation method and the causes of neutral point potential imbalance are analyzed. Then a neutral point potential balance method based on space-vector switching technology is proposed, in which the revision of the current PWM signal is completed through small voltage vector equivalent switching according to the measurement of voltage and AC current of two capacitors, leading to the neutral point potential balance. Simulation results verify the feasibility of the proposed method.

Key words: three-level inverter; neutral point potential balance; vector switching

0 引言

三电平逆变器由于其无需经过功率开关管的直接串并联而实现高电压、大容量, 并且其输出电压谐波含量少, 被广泛应用于新能源并网和中高压大容量交流调速场合。但是在三电平逆变器的应用中, 2 个直流电容电压不等造成中性点电位失衡, 在交流侧产生低次谐波, 同时使每个功率开关器件所承受的电压不等, 在有源逆变过程中还会造成逆变失败, 直接降低了系统的可靠性。因此, 实现中性点电位平衡, 是实现三电平逆变器诸多优良性能的重要前提^[1,2]。

笔者首先建立三电平并网逆变器的数学模型, 详细分析了空间矢量脉宽调制的特性和中性点电位

失衡的原因, 在此基础上研究了一种基于空间矢量切换技术的中性点电位平衡策略, 该策略是通过对当前 PWM 信号进行适当的修正, 且不限于实现 PWM 信号的数学处理方法, 因而对三电平逆变器具有通用性。该方法的主旨思想是根据当前中性点电位的不平衡度对 PWM 触发脉冲进行修正, 在不影响逆变器输出特性的前提下, 实现中性点电位的平衡工作, 最后仿真结果验证了该方法的正确性。

1 三电平并网逆变器数学模型

为了便于分析, 首先引入开关函数的概念, 用开关变量表示逆变器各桥臂的开关状态, 将三相三电平并网逆变器的功率开关器件用 3 个单刀三掷开关来代替, 其开关函数模型见图 1。定义为第 i 相 ($i=a,$

收稿日期: 2009-06-22; 修回日期: 2009-08-13

作者简介: 石新春(1950), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用、交流电机调速、新能源发电技术等。

b, c) 的开关函数, 即相应的 3 个单刀开关可用 S_a 、 S_b 、 S_c 表示, 每个单刀三掷开关函数 S_i 可分解为 S_{ip} 、 S_{io} 、 S_{in} 3 个单刀开关, 当开关接通时为 1, 关断时为 0。 u_{dk1} 、 u_{dk2} 表示两直流电容电压; i_o 表示直流侧中性点电流, 并定义输出为正; i_a 、 i_b 、 i_c 为输出的三相交流电流; e_a 、 e_b 、 e_c 为三相电网电势^[3,4]。

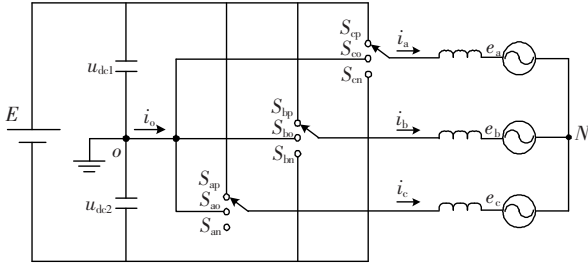


图 1 三电平并网逆变器开关函数模型

2 电压矢量对中性点电位的影响

由三电平并网逆变器的开关函数模型可知, A、B、C 三相的开关函数总共有 27 种不同组合方式, 进而形成了 27 个电压矢量, 按照电压矢量幅值由大到小的原则可将这 27 个电压矢量划分成 4 组, 即大矢量、中矢量、小矢量和零矢量, 其中小矢量又可分为正小矢量和负小矢量。

大矢量对应的开关状态使得对应的输出和正负直流母线相连, 不会影响中性点电压; 零矢量使得负载三相短路, 并挂在正、负、零母线之一上, 也不会导致中性点电压的波动。而中矢量和小矢量意味着三相负载的一相或者两相被连接到中性点, 并经过直流母线分压电容和正负母线形成电流回路, 这将产生引起中性点电压波动的中性点电流 i_o , 使得中性点电压偏离平衡位置。下面取一组用于合成参考矢量的基本矢量, 分别为大矢量 PNN、中矢量 PON、正小矢量 POO、负小矢量 ONN, 画出 PON、POO、ONN 作用时实际电路拓扑和电流回路, 分别见图 2, 说明中矢量和小矢量对中性点电压失衡造成的影响^[5]。

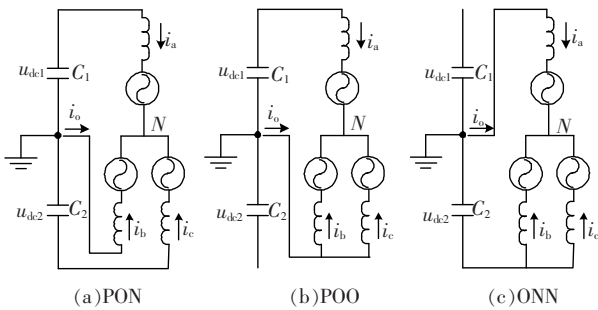


图 2 电压矢量作用下实际电路拓扑和电流回路

由图 2 可知, 对于中矢量 PON, $i_o=i_b$, 若并网电

流 $i_b>0$, 则电容 C_1 充电, 电容 C_2 放电, 造成中性点电压下降; 反之若 $i_b<0$, 则中性点电压上升。对于正小矢量 POO, $i_o=i_b+i_c=-i_a$; 而对于负小矢量 ONN, $i_o=i_a$ 。显然正小矢量和与其对应的负小矢量(这是一对冗余小矢量)对中性点电压的作用正好相反。

在每对冗余小矢量作用下, 逆变器输出的线电压是相同的, 但引起的中性点电流极性却是相反的。由于中矢量引起的中性点电流取决于负载相位, 对于中矢量无法实现直接控制。控制中性点电位平衡通常采取的措施是调整正负小矢量的作用时间^[6,7]。

3 基于矢量切换的中性点电位平衡方法

通过调整正负小矢量的作用时间, 即根据实时中性点电压的不平衡度对正负小矢量进行等效切换, 进而在不影响逆变器输出线电压的前提下实现中性点电位的平衡运行, 其控制框图见图 3。

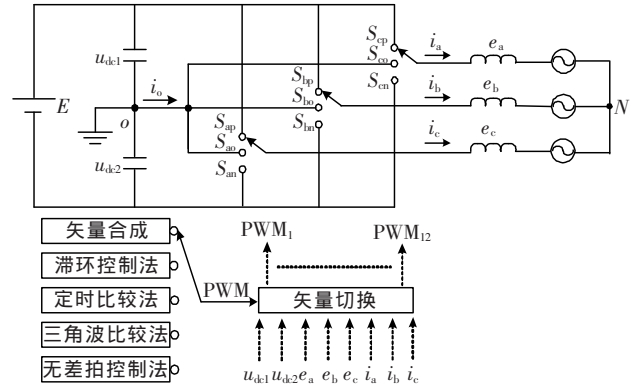


图 3 中性点电位平衡控制框图

这里的等效切换是一个对当前控制系统计算得到的 PWM 信号进行修正的概念, 所以这种中性点电位控制策略对控制系统计算 PWM 信号的数学方法没有限制, 它可以是矢量合成法、滞环控制法、定时比较法、三角波比较法以及无差拍控制法中的任何方法, 它只是对用上述方法计算得到 PWM 信号的一个修正环节, 所以该方法对三电平逆变器中性点平衡控制具有通用性, 矢量等效切换算法框图见图 4。现在关键问题是把中性点电位的不平衡度转化成正负小矢量的切换信号, 下面对这个切换信号 T 的定义做详细分析。

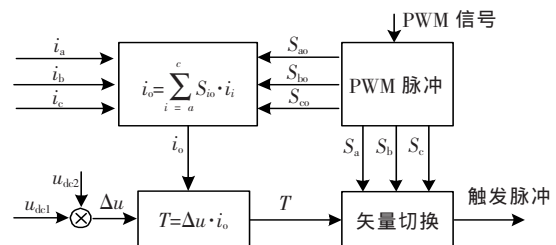


图 4 矢量等效切换算法框图

对于任一相桥臂,当该桥臂被连接到中性点时,此相并网电流会流入中性点,该中性点电流的瞬时值可以表示为

$$i_o = S_{a0} \cdot i_a + S_{b0} \cdot i_b + S_{c0} \cdot i_c \quad (1)$$

对于三相三电平并网逆变器,只有当某相的开关函数满足 $S_{i0}=1$ 时,该相的输出电流才会影响到中性点电流。由(1)式可知,可以通过开关函数和三相交流电流得到瞬时的中性点电流。在此定义中性点电压偏差 Δu 为

$$\Delta u = u_{dk1} - u_{dk2} \quad (2)$$

由(1)和(2)式定义矢量切换信号 T 为

$$T = \Delta u \cdot i_o \quad (3)$$

矢量切换的规则:若当前的PWM触发信号对应的电压矢量不是小矢量,则对该触发信号不做任何调整,直接触发相应的开关器件,否则需根据切换信号的状态按照以下规则对当前PWM触发信号做相应调整。

若 $T > 0$,则把当前正小矢量的PWM触发脉冲切换成相应的负小矢量PWM触发脉冲;

若 $T < 0$,则把当前负小矢量的PWM触发脉冲切换成相应的正小矢量PWM触发脉冲。切换信号与开关矢量的关系见表1。

表1 切换信号与开关矢量的关系

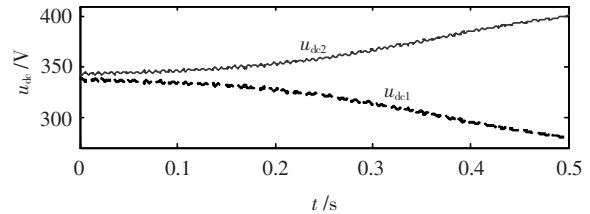
矢量名称	切换信号满足条件	当前矢量	切换后矢量
正小矢量	$T > 0$	POO	ONN
		OPO	NON
		OOP	NNO
		PPO	OON
		OPP	NOO
		POP	ONO
负小矢量	$T < 0$	ONN	POO
		NON	OPO
		NNO	OOP
		OON	PPO
		NOO	OPP
		ONO	POP

在此仍以正小矢量POO、负小矢量ONN这对冗余矢量为例说明矢量切换的工作原理。如当前逆变器的实时状态为 $u_{dk1} > u_{dk2}$,中性点电流 $i_o > 0$,则切换信号 $T > 0$,为了保证中性点电位平衡,需要电容 C_1 放电,电容 C_2 充电,于是若当前的PWM触发脉冲对应的矢量为正小矢量POO,根据矢量等效切换原则,把当前的PWM触发脉冲矢量切换成相应的负小矢量ONN,即把本应对电容 C_1 充电的矢量切换成对电容 C_2 充电的矢量,从而实现中性点电位向平衡位置靠拢。在矢量切换的过程中,三电平逆变器输

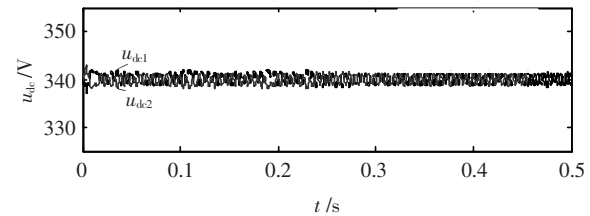
出的线电压没有发生任何变化。

4 实验验证

通过Matlab/Simulink 软件设计了三相三电平并网逆变器系统,该系统的直流母线电压为680V,交流侧为380V系统,逆变器的容量为100kW。该系统的PWM触发信号是通过滞环比较法得到的,矢量切换技术即对该PWM信号进行修正,实验波形见图5~8。

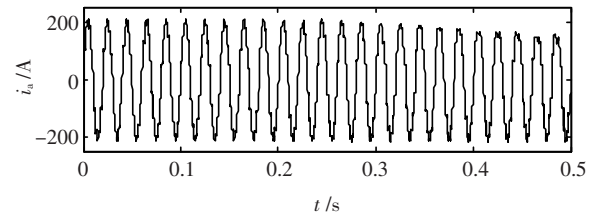


(a)加入平衡措施前电容电压

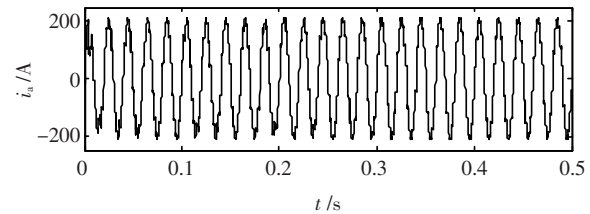


(b)加入平衡措施后电容电压

图5 直流侧电容电压变化曲线



(a)加入平衡措施前a相逆变电流



(b)加入平衡措施后a相逆变电流

图6 逆变电流变化曲线

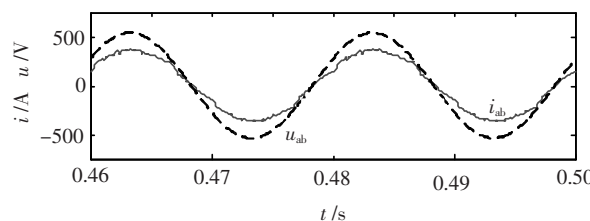


图7 加入平衡措施后逆变器输出电流与电压波形

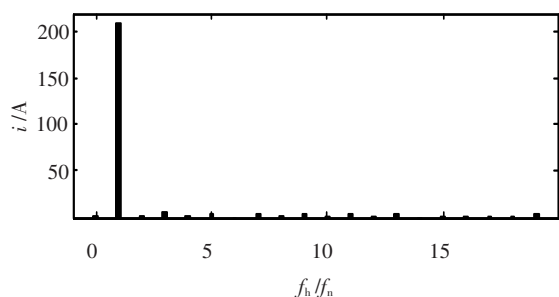


图 8 加入平衡措施后逆变器并网电流频谱

5 结论

从实验结果可将该控制方法做如下几点总结:

(1) 这种基于矢量切换方式的中性点电位平衡控制策略对三电平逆变器具有通用性;

(2) 通过这种控制方法可实现两直流电容电压偏差在允许范围内稳定工作;

(3) 由逆变电流的波形可知, 这种控制策略可有效地避免因中性点电压不平衡造成的逆变失败现象, 提高系统工作的可靠性。

(上接第 60 页)

再利用彩色图像分割法进行目标提取, 阈值选择会比较困难, 提取效果相应变差。而灰度图像分割法不受颜色限制, 因此受设备运行时间影响很小, 具有一般性。

参考文献:

- [1] 程明. 无人值守变电站监控技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 唐慧明, 张健. 变电站远程图像监控系统设计[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(7): 56-58.
- [3] 岳嵩, 戴礼荣, 宋彦. 基于单片 DSP 的嵌入式视频监控终端及系统的实现[J]. 计算机辅助工程, 2005, 13(3): 47-51.
- [4] 王继业. 推动电力信息化应重视的几个问题[J]. 中国电力, 2002, 35

(上接第 64 页)

- [3] GAO Y G, ZHANG S H. Electromagnetic Radiation Biology Effect[J]. Safety & EMC, 2002(6): 49-52.
- [4] U.S. Department of Energy. National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS) and National Institutes of Health [R]. Assessment of Health Effects from Exposure to Power-line Frequency Electric and Magnetic Fields, EMF Working Group (EMF RAPID Program) Report, 1999.
- [5] 林鹤云. 三维涡流场的一种迭代解法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 72-75.
- [6] 刘国强, 赵凌志. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [7] RUAN J J, CHEN X Z, ZHOU K D. 3D Transient Eddy Current Calculation by the Hybrid FE-BE Method Using

参考文献:

- [1] CELANOVIC N, BOROYEVICH D. A Comprehensive Study of Neutral-point Voltage Balancing Problem in Three-level neutral-point-clamped Voltage Source PWM Inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electron, 2000(15): 242-249.
- [2] NABAE A, TAKAHASHI I, AKAGI H. A New Neutral Point Clamped PWM Inverter[J]. IEEE Trans on IA, 1981, 17(5): 518-523.
- [3] 宋文祥, 陈国呈, 丁肖宇, 等. 基于两类脉宽调制方式本质联系的三电平逆变器中点电压平衡控制的研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 76-80.
- [4] YO-HAN LEE, BUM-SEOK SUH, CHANG-HO CHOI, et al. A New Neutral Point Current Control for a 3-level Converter/inverter Pair System[J]. IEEE Ind. Electron, 1999(3): 1528-1534.
- [5] 林磊, 邹云屏, 钟和清, 等. 二极管箝位型三电平逆变器控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 33-39.
- [6] WANG F. Coordinated Control of Regenerative Three-level Neutral Point Clamped PWM Voltage Source Inverter [J]. Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting, 2002(1): 537-543.
- [7] 姚文熙, 吕征宇, 费万民, 等. 一种新的三电平中点电位滞环控制法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 92-96.

(1): 64-67.

- [5] 赵书涛, 李宝树, 崔桂彦, 等. 基于计算机视觉的远程变电站状态监测与诊断新策略[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 63.
 - [6] 吕文阁, 刘建群, 陈泽宇. 应用数字图像处理技术的物位测控系统的研究[J]. 机床与液压, 2005(11): 106-107.
 - [7] 四维科技, 胡小锋, 赵辉. 图像处理与识别实用案例精选[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
 - [8] 张健, 唐慧明. 变电站远程图像监控系统[J]. 数字化技术, 2001(1): 18.
 - [9] 崔屹. 图像处理与分析—数学形态学方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
 - [10] SERRA J. Image Analysis and Mathematical Morphology [M]. London: Academic Press, 1982.
- Magnetic Field Intensity H[J]. IEEE Trans. on Mag., 1995, 31(3): 1408-1411.
- [8] 张秀敏, 苑津莎, 程志光, 等. 电磁场数值分析中棱单元矢量插值函数的研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 62-67.
 - [9] 张秀敏, 苑津莎, 崔翔, 等. 用棱边与节点有限元耦合的 $E-E-\psi$ 法计算涡流场[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 70-74.
 - [10] 冯利君. 电抗器工频干扰磁场屏蔽研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
 - [11] 张波, 崔翔. 计及导体互感的复杂接地网的频域分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 4(23): 77-80.
 - [12] 国际非离子辐射防护委员会. 限制时变电场、磁场和电磁场 (300 GHz 以下) 暴露的导则[S]. 1998.