

[逆变器]

基于空间矢量调制的中点电位平衡控制方法仿真与分析

文/管爱伟^{1,2} 卢宝宏^{1,2} 王逸超^{1,2} 戴恩强^{1,2} 高琨含^{1,2}

1. 新源智储能发展（北京）有限公司；2. 电化学能源消防安全联合创新应急管理重点实验室

以T型三电平逆变器为模型，从拓扑结构及空间矢量控制策略等方面分析产生中点电位不平衡的原因，针对中点电位不平衡，提出通过上下母线电压的闭环控制调节冗余小矢量作用因子，从而改变PN小矢量作用时间，调节中点电位平衡。最后搭建实验平台进行仿真与实验验证，实验结果验证中点电位平衡控制方法的有效性与可行性。

近年来，随着新型电力系统的快速创新发展，逆变器技术也在快速更新迭代。当前主流厂商的逆变器都采用先进的三电平拓扑结构，通过增加开关管的数量，有效解决传统两电平拓扑结构的电压谐波畸变率高、输出容量小等问题。但在三电平拓扑结构中，由于把中性点电位N引入控制策略中，开关管动作会引起直流侧母线电压中点有电流流入或者流出，进而会引起中点电位产生波动。三电平逆变器直流侧母线电压中点电位不平衡的原因可归结为以下几个方面：①生产工艺造成的电容参数不均；②开关延迟及死区；③调制算法本身导致；④工况变化等。中点电位波动会导致输出电压畸变、波形质量变差，器件电压应力增加，电容寿命缩短等后果。

针对中点电位不平衡问题，解决方法主要集中在硬件和软件两方面。硬件上可通过附加变换器将电容电压钳位，软件上可通过改变调制策略实现中点电位平衡控制。本文从空间矢量调制策略入手，分析中点电位波动的原理，并提出通过控制母线电压的闭环控制调节冗余小矢量作用因子。调节PN小矢量作用时间，调节中点电位平衡。仿真和实验结

果均验证中点电位平衡的有效性和可行性。

T型三电平拓扑结构及中点电位分析

1. T型三电平逆变器拓扑

图1为T型三电平拓扑结构， C_1 、 C_2 为直流母线电容， $S_1 \sim S_{12}$ 是12组功率开关，每组功率开关包含1个MOSFET和1个二极管， U_{dc} 为直流侧电压， U_a 、 U_b 、 U_c 为三电平逆变侧输出电压， I_a 、 I_b 、 I_c 为逆变电流。

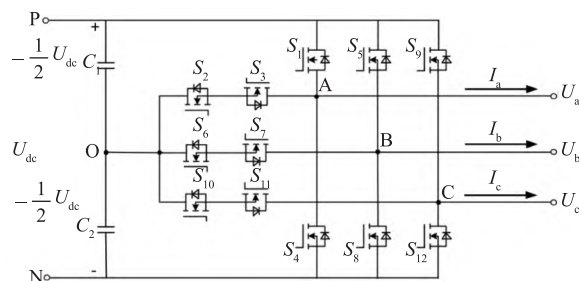


图1 T型三电平拓扑结构

选取A相分析换相过程，输出高电平记为P，输出低电平记为N，输出零电平记为O， $S_1 \sim S_4$ 共有以下开关管状态如图2所示，P、N、O三种电平对应开关状态见表1。

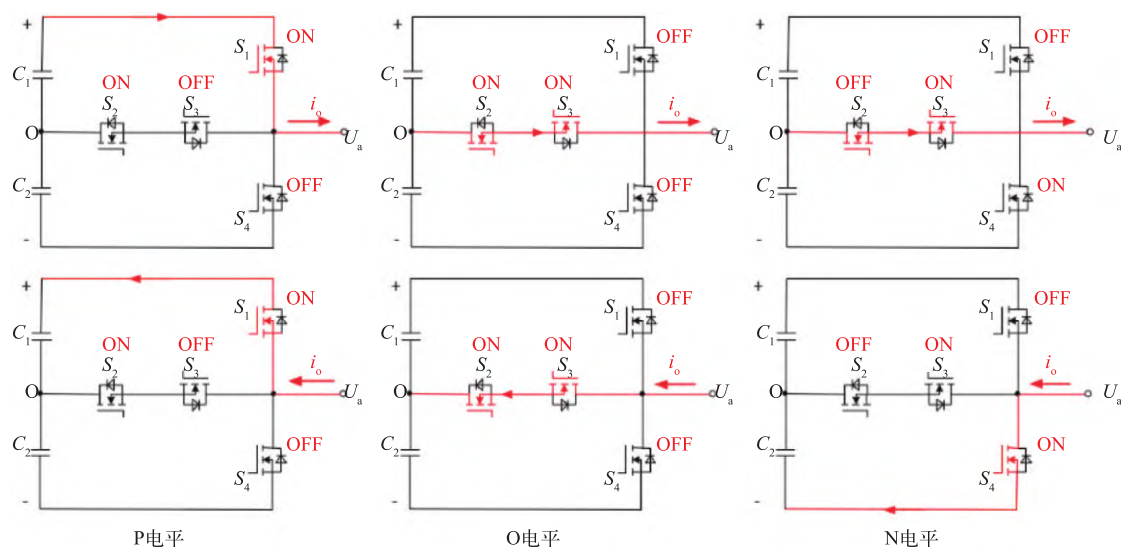


图2 换相过程分析

表1 开关状态与电平对应关系

电平	U_o	S_1	S_2	S_3	S_4
P	$\frac{1}{2}U_{dc}$	ON	ON	OFF	OFF
O	0	OFF	ON	ON	OFF
N	$\frac{1}{2}U_{dc}$	OFF	OFF	ON	ON

在每相中， S_1 与 S_3 互补， S_2 与 S_4 互补， S_1 与 S_4 不能同时导通。每相输出电压存在三种电平P、O、N；三相共有 $3^3=27$ 种开关组合状态，对应27个空间电压矢量，包括3个零矢量，12个小矢量，6个中矢量，6个大矢量，如图3所示。

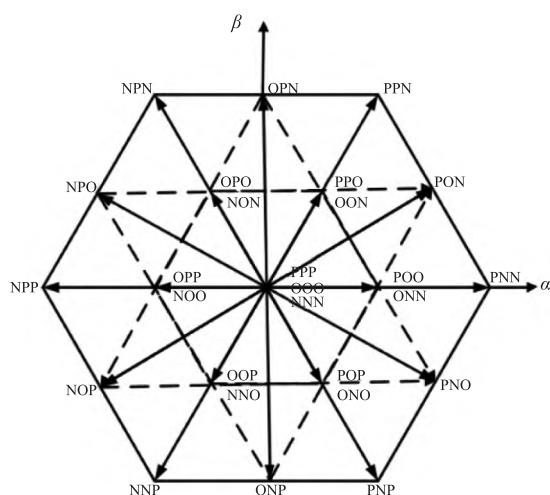


图3 T型三电平空间矢量图

2. 中点电位不平衡分析

中点电位不平衡是由T型三电平自身拓扑结构

造成的，按照空间矢量下的开关组合状态，逆变器输出端与直流侧母线中点相连时，存在对直流侧母线上、下电容充放电不平衡情况，从而导致直流母线上、下电容存在压差，如图4所示。选取第一大扇区以下4种情况进行分析。

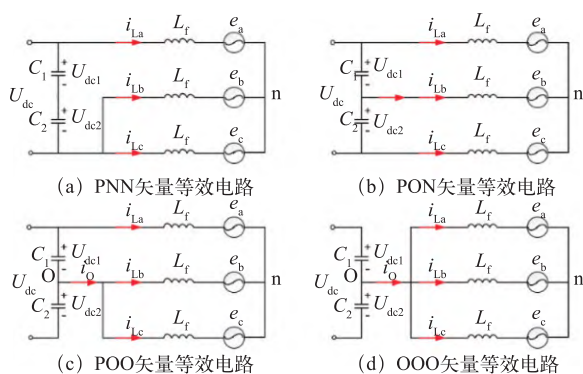


图4 矢量等效电路

1) 大矢量以PNN矢量等效电路为例，如图4a所示，输出端均未与母线中点相连，不存在零电平通路，因此不会对母线中点电容进行充、放电，母线中点电压不会发生波动。

2) 中矢量以PON矢量等效电路为例，如图4b所示，B相与母线中点电位相连，母线中点电流 $I_0=I_{Lb}=-(I_{La}+I_{Lc})$ ，中点电位会有电流的流入或流出，因此会对母线中点电容进行充、放电，母线中点电压会发生波动。

中矢量等效中点电流见表2。

表2 中矢量对应等效中点电流情况

中矢量	等效中点电流	中矢量	等效中点电流
PON	I_{Lb}	NOP	I_{Lb}
OPN	I_{La}	ONP	I_{La}
NPO	I_{Lc}	PNO	I_{Lc}

3) 小矢量以POO矢量等效电路为例,如图4c所示,B相、C相与母线中点电位相连,母线中点电流 $I_0=I_{Lb}+I_{Lc}=-I_{La}$,中点电位会有电流的流入或流出,因此会对母线中点电容进行充、放电,母线中点电压会发生波动。

小矢量等效中点电流见表3。

表3 小矢量对应等效中点电流情况

P小矢量	等效中点电流	N小矢量	等效中点电流
POO	$-I_{La}$	ONN	I_{La}
PPO	I_{Lc}	OON	$-I_{Lc}$
OPO	$-I_{Lb}$	NON	I_{Lb}
OPP	I_{La}	NOO	$-I_{La}$
OOP	$-I_{Lc}$	NNO	I_{Lc}
POP	I_{Lb}	ONO	$-I_{Lb}$

4) 零矢量以OOO矢量等效电路为例,如图4d所示,A相、B相、C相同时与母线中点电位相连,母线中点电流 $I_0=I_{La}+I_{Lb}+I_{Lc}$, $I_0=I_{La}+I_{Lb}+I_{Lc}=0$,中点电位不会有电流的流入或流出,因此不会对母线中点电容进行充、放电,母线中点电压不会发生波动。

综上所述,可得如下结论:①只有当与电容中点连接的零电平通路流过电流时,对上下电容进行充放电,中点电位才会发生波动;②只有中矢量和小矢量会对中点电位波动产生影响,大矢量和零矢量不会对中点电位波动产生影响;③冗余小矢量的等效中点电流极性恰好相反,为主动中点电位控制提供了可行性。

中点电位平衡控制方法

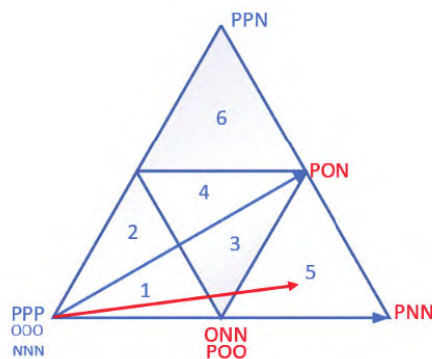
1. 控制原理

基于以上结论,大矢量和零矢量不会对中点电位波动产生影响,而小矢量存在等效中点电流极性互补情况,可利用此特点展开通过合理调制小矢量作用时间来控制中点电位平衡的内容研究。

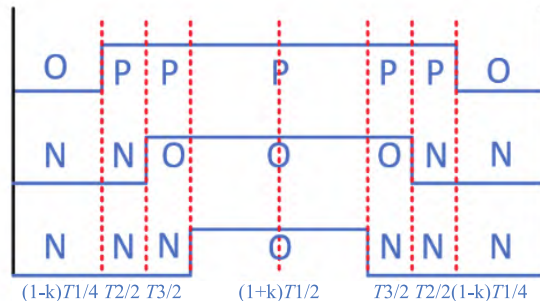
由表3可知,小矢量可分为P小矢量和N小矢量,P小矢量等效中点电流流入电容中点,使得 U_{dc1}

减小, U_{dc2} 增大;N小矢量等效中点电流流出电容中点,使得 U_{dc1} 增大, U_{dc2} 减小。

以合成矢量位于第一大扇区第5小扇区为例,如图5a所示。矢量作用为大矢量PNN、中矢量PON、小矢量ONN和POO,ONN和POO作用时间记为 $T1$,PNN作用时间记为 $T2$,PON作用时间记为 $T3$;对4个矢量按七段式序列排布,如图5b所示。同时引入上下母线电压的闭环控制调节冗余小矢量作用因子 k ,调节ONN和POO小矢量作用时间,可改变七段发波序列作用时间,从而实现中点电位平衡目标。



(a) 第一大扇区第5小扇区



(b) 七段式序列排布

图5 合成矢量七段式分布分析

2. 具体实现框图

如图6所示, u_a 、 u_b 、 u_c 三相电压经过三二变换得到 u_α 、 u_β ,经过扇区判断确定作用矢量,然后根据伏秒平衡原理确定矢量作用时间和序列。冗余小矢量通过电容电压 u_{c1} 、 u_{c2} 确定,当 $u_{c1}>u_{c2}$ 时, $k>0$,P小矢量作用时间增加;当 $u_{c1}<u_{c2}$ 时, $k<0$,N小矢量作用时间增加,通过上下母线电压的闭环控制调节冗余小矢量作用因子 k ,调节PN小矢量作用时间,进而调节中点电位平衡。

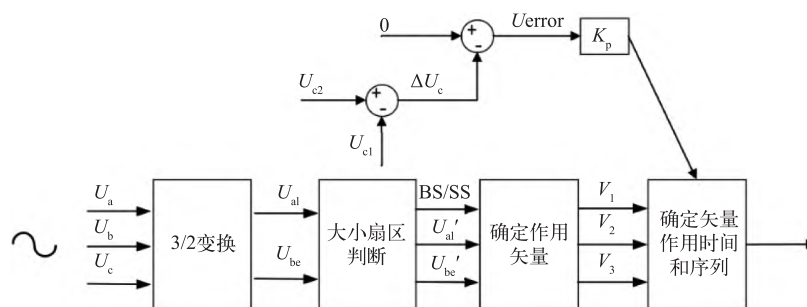


图6 控制策略实现框图

仿真与实验验证

根据前面分析，在MATLAB/Simulink中搭建了T型三电平逆变器仿真模型，并把中点电位平衡控制方法引入仿真模型。系统参数设置为：直流侧 $U_{dc}=400\text{ V}$ ， $C_1=C_2=2\ 240\ \mu\text{F}$ ；交流侧电容 $C=5\ \mu\text{F}$ ，电感 $L=1\ \text{mH}$ ，负载 $R=10\ \Omega$ ；开关频率 $f_s=10\ \text{kHz}$ ，

初始设置母线电压40 V电压差，调制度在0.08 s从0.4阶跃到0.8。

调制实现过程、中点电位控制效果如图7~图9所示，分别为上下母线电压波形图、上下母线电压差波形图和中点电位控制效果图。

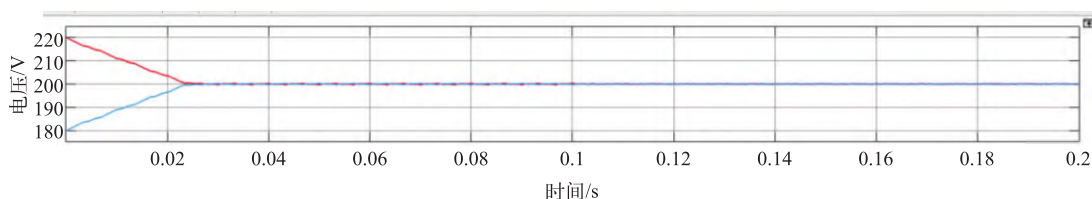


图7 上下母线电压波形图

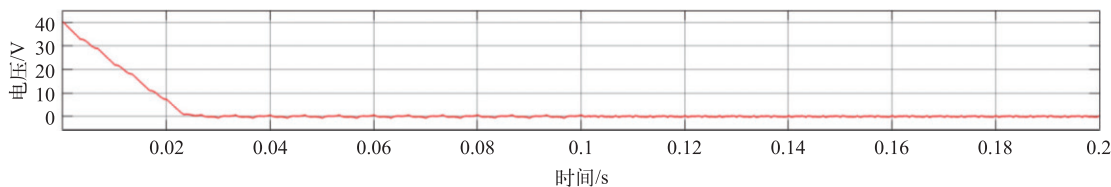


图8 上下母线电压差波形图

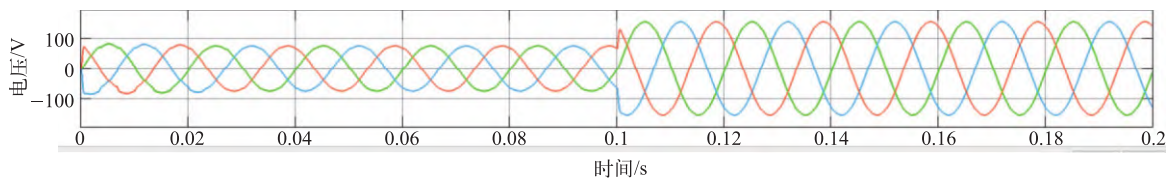


图9 中点电位控制效果图

结束语

本文搭建的T型三电平逆变器仿真模型，很好地验证了空间矢量控制策略下中点电位平衡调制的有效性，从图8~图10可以看出，初始母线电压差40 V经过中点电位平衡控制，可通过上下母线电压

的闭环控制调节小矢量作用因子 k ，调节PN小矢量作用时间，在0.026 s达到电压差为0 V，最终达到调节中点电位平衡的目的。EA

(收稿日期：2024-08-23)