

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180897

考虑中点电压平衡的三相四开关变换器模型预测电压控制

王永辉¹, 何帅彪², 冯瑾涛³, 马孝强⁴, 乔中华⁴, 金楠², 汪义旺⁵

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 郑州轻工业大学电气信息工程学院, 河南 郑州 450002;

3. 许昌开普检测研究院股份有限公司, 河南 许昌 461000; 4. 国网河南省电力公司三门峡供电公司,

河南 三门峡 472000; 5. 苏州市职业大学, 江苏 苏州 215104)

摘要: 三相四开关变换器作为三相六开关变换器的容错结构, 在离网模式下, 直流侧电流经电容流入故障相, 导致直流侧中点电压不平衡, 进而降低了负载侧电能质量, 影响电容器寿命。针对此问题, 设计一种考虑中点电压平衡的模型预测电压控制策略。首先, 对离网模式下的电压矢量进行分析, 建立 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下的电压预测模型。在此基础上设计中点电压平衡控制, 通过低通滤波器提取直流侧电容中点电压偏差值中的直流分量, 经预测模型计算得到电流补偿值。将其代入价值函数求解最优电压矢量, 进行模型预测电压控制, 实现三相四开关变换器离网模式操作。该控制策略无需锁相环和 PWM 调制, 易于实现。通过仿真及实验, 验证了所提出控制策略的有效性。

关键词: 三相四开关变换器; 电容电压均衡; 电压预测模型; 价值函数; 离网模式

Model predictive voltage control of three-phase four-switch converter in island mode considering capacitor voltage balancing control

WANG Yonghui¹, HE Shuaibiao², FENG Jintao³, MA Xiaoqiang⁴, QIAO Zhonghua⁴, JIN Nan², WANG Yiwang⁵

(1. XJ Electric Co., Xuchang 461000, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light

Industry, Zhengzhou 450002, China; 3. Xuchang KETOP Testing Research Institute Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 4. State

Grid Sanmenxia Power Supply Company, Sanmenxia 472000, China; 5. Suzhou Vocational University, Suzhou 215104, China)

Abstract: The three-phase four-switch converter is a fault-tolerant structure of a three-phase six-switch converter. In the island mode, the DC-link current flows into the fault phase through the capacitor, resulting in the separation capacitor voltage unbalance, which affects the power quality of the load side and reduces the service life of the capacitor. To solve this problem, a model predictive voltage control strategy considering neutral point voltage balance is proposed. First, the voltage vector is analyzed in the island mode, and voltage prediction model is established based on $\alpha\beta$ two-phase stationary coordinate. On this basis, the neutral point voltage balance control is designed through extracting the DC component in the midpoint voltage deviation of the DC side capacitor. The current compensation value is calculated by the prediction model and then model predictive voltage control in the inland mode is realized. The proposed control strategy does not require phase-locked loop or PWM modulation. Simulation and experiment results verify the effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607159).

Key words: three-phase four-switch converter; capacitor voltage balancing; voltage predictive control; cost function; island mode

0 引言

微电网的出现使得太阳能、风能等新能源的使

用更加灵活与便捷^[1-6]。微电网中三相六开关并网变换器是实现能量双向流动的重要“桥梁”, 当新能源进行并网发电时, 为负载提供稳定的电能。当新能源发电不足时, 电网通过变换器转换为直流电供负载使用^[7-9]。电网出现故障时, 通过孤岛检测系统使微电网与大电网脱离。微电网进入离网工作模式, 为交直流负载进行可靠供电。微电网在转变工作模式与换流过程中, 变换器处于大功率、高电压、高

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目资助(51607159); 河南省高等学校科技创新人才支持计划资助(18HASTIT025); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划资助(2015GGJS-180)

频率工作环境, 容易出现换流失败、桥臂短路、桥臂断路等故障, 造成并网失败与负载侧供电不稳定等问题^[10-12]。

针对变换器多种故障问题, 为避免微电网与电网解列, 保证负载侧可靠供电, 在发生桥臂故障后, 常采用三相四开关结构。三相四开关结构采用双向晶闸管将桥臂短路故障与开路故障转换为开路结构, 故障相连至直流母线中点。不需要增加额外的开关器件, 通过容错控制算法实现故障容错运行。文献[13]基于 SVPWM 调制方法, 固定开关模式的分配原则, 通过对电压矢量进行补偿, 实现变换器容错运行。文献[14]为提高三相四开关变换器直流母线电压的利用率, 提出一种 SVPWM 过调制算法, 即计算载波脉宽调制等效算法, 得出全调制范围内调制函数变换规律, 有效提高了逆变器输出电能质量。文献[15]提出一种模型预测电流控制策略, 基于模型参考自适应技术对定子电阻在线辨识, 增强定子电阻变化鲁棒性。同时将优化开关频率写入系统目标函数, 有效降低了系统开关频率。文献[16]将三相四开关变换器作为三相双降压式变换器的容错结构, 对其进行等效分析, 采用空间矢量滞环控制, 改善了系统对输入扰动与电网扰动的抑制能力。然而, 滞环控制下变换器的工作性能受负载参数、环宽大小影响较大, 通常需要较小的环宽和较高的采样频率。

三相四开关变换器将故障相连接至直流母线中点, 导致母线中点电压不平衡, 将导致变换器输出电流 THD 增加^[17-18]。针对此问题, 文献[19]基于 SVPWM 调制, 对故障相电流进行补偿, 实现电容电压均衡控制, 改善并网电能质量。文献[20]分析了电源阻抗不平衡是导致逆变输出不平衡的原因, 针对该问题, 在 SVPWM 调制的基础上, 提出改进的三角波调制方法, 对直流侧中点电压进行补偿, 有效改善了变换器输出不平衡问题。与滞环控制和 SVPWM 控制相比, 有限状态模型预测控制(Finite Control Set MPC, FCS-MPC)通过设定价值函数循环寻优, 直接选取最优电压矢量作用于开关器件, 无需 PWM 调制单元与锁相环。针对中点电压不平衡问题, 可以灵活设定价值函数, 通过在价值函数上增加直流侧电压约束条件, 实现中点电压平衡控制。文献[17-20]对并网系统中点电压不平衡问题进行了研究, 对于离网模式下变换器的中点电压平衡问题没有做进一步分析。

离网模式下, 为了使变换器在故障状态下给负载提供稳定可靠的电能, 消除直流母线电容电压偏

差。本文基于有限状态模型预测控制理论, 通过对三相四开关变换器容错结构电压矢量进行分析, 设计三相四开关变换器模型预测电压控制策略, 为负载提供稳定的电压与频率。同时, 为实现直流母线中点电压均衡控制, 通过低通滤波器提取故障相电流直流偏量, 对变换器进行电流补偿, 实现模型预测电压控制, 消除直流母线中点电压不平衡。该策略无需锁相环和 PWM 调制, 具有较好的稳态特性与动态特性。仿真及实验结果验证了所提出控制策略的有效性。

1 三相四开关变换器电压矢量分析

离网三相四开关变换器结构如图 1。其中, L 、 R 和 C_f 分别表示负载侧三相电感、电感内阻和电容, C_1 和 C_2 表示直流侧电容, Z_n 表示负载。

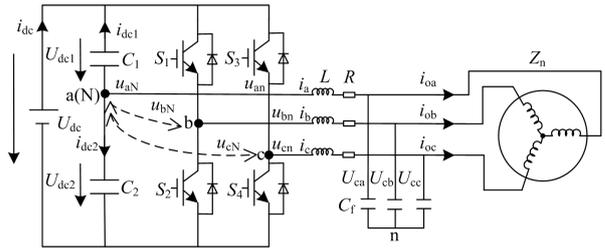


图 1 离网模式下三相四开关变换器容错结构

Fig. 1 Fault tolerant structure of three-phase four-switch converter in island mode

故障相 a 连至直流侧电容中点 N, 则 $u_{aN} = 0$ 。

$$u_{nN} = \frac{1}{3}(u_{bN} + u_{cN}) \quad (1)$$

则变换器相电压表达式为

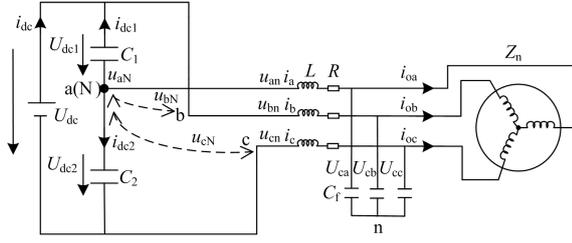
$$\begin{cases} u_{an} = -\frac{1}{3}(u_{bN} + u_{cN}) \\ u_{bn} = \frac{1}{3}(2 \cdot u_{bN} - u_{cN}) \\ u_{cn} = \frac{1}{3}(2 \cdot u_{cN} - u_{bN}) \end{cases} \quad (2)$$

令开关状态 $S_i (i = b, c)$ 为

$$S_i = \begin{cases} 1 & i \text{ 相上桥臂导通, 下桥臂关断} \\ 0 & i \text{ 相上桥臂关断, 下桥臂导通} \end{cases} \quad (3)$$

当 $S_b=1, S_c=0$ 时, 变换器电流路径如图 2 所示, 由 KVL 定理得线电压 u_{ba} 、 u_{ca} 表达式。根据开关状态 S_i 不同变化, 线电压 u_{ba} 、 u_{ca} 与 S_b 、 S_c 变化关系如表 1。

$$\begin{cases} u_{ba} = U_{dc1} \\ u_{ca} = -U_{dc2} \end{cases} \quad (4)$$

图2 三相四开关变换器 $S_b=1, S_c=0$ Fig. 2 Three-phase four-switch converter $S_b=1, S_c=0$ 表1 三相四开关变换器线电压与 S_b, S_c 关系表Table 1 Relationship between line voltage of three-phase four-switch converter and switching states S_b and S_c

S_b	S_c	u_{ba}	u_{ca}
0	0	$-U_{dc2}$	$-U_{dc2}$
0	1	$-U_{dc2}$	U_{dc1}
1	0	U_{dc1}	$-U_{dc2}$
1	1	U_{dc1}	U_{dc1}

根据表1中直流侧电容电压 U_{dc1} 和 U_{dc2} 与开关状态的关系, 得三相四开关变换器线电压 u_{ba}, u_{ca} 表达式为

$$\begin{bmatrix} u_{ba} \\ u_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_b & S_b - 1 \\ S_c & S_c - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{dc1} \\ U_{dc2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)得相电压 u_{an}, u_{bn}, u_{cn} 表达式为

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{U_{dc1}}{3}(-S_b - S_c) + \frac{U_{dc2}}{3}(2 - S_b - S_c) \\ u_{bn} = \frac{U_{dc1}}{3}(2S_b - S_c) + \frac{U_{dc2}}{3}(2S_b - S_c - 1) \\ u_{cn} = \frac{U_{dc1}}{3}(2S_c - S_b) + \frac{U_{dc2}}{3}(2S_c - S_b - 1) \end{cases} \quad (6)$$

定义输出三相电压空间矢量 \vec{v}_i 为

$$\vec{v}_i = \frac{2}{3}(u_{an} + a u_{bn} + a^2 u_{cn}) \quad (7)$$

式中, $a = e^{j2\pi/3}$ 。根据 Clark 变换公式, 得输出三相相电压在 U_α, U_β 两相静止坐标系下的数学表达式, 并根据不同开关变化状态, 输出线电压矢量如表2所示。

表2 三相四开关变换器电压矢量

Table 2 Voltage vector of three-phase four-switch converter

S_b	S_c	矢量	u_α	u_β
0	0	\vec{v}_{00}	$2U_{dc2}/3$	0
0	1	\vec{v}_{01}	$(U_{dc2} - U_{dc1})/3$	$-\sqrt{3}(U_{dc1} + U_{dc2})/3$
1	0	\vec{v}_{10}	$(U_{dc2} - U_{dc1})/3$	$\sqrt{3}(U_{dc1} + U_{dc2})/3$
1	1	\vec{v}_{11}	$-2U_{dc1}/3$	0

2 三相四开关变换器电压预测模型

在离网模式下, 三相四开关变换器由于直流侧分离电容电压不均衡, 将增加逆变器输出电流谐波含量, 进而降低负载侧电压质量。针对该问题, 基于模型预测电压控制策略, 实现直流侧分量电容电压均衡控制, 有效改善逆变器负载侧电压质量。

根据 KVL 定理, 建立滤波器电感电流空间矢量表达式为

$$L \frac{d\vec{i}_r}{dt} = \vec{v}_i - \vec{v}_c - \vec{i}_r \cdot R \quad (8)$$

同理, 电容电压空间矢量数学模型为

$$C \frac{d\vec{v}_c}{dt} = \vec{i}_r - \vec{i}_o \quad (9)$$

式(8)、式(9)中, $\vec{v}_i, \vec{i}_r, \vec{v}_c, \vec{i}_o$ 分别为三相四开关变换器输出三相空间矢量相电压、滤波器电感三相空间矢量电流、滤波器电容三相空间矢量电压和负载侧三相空间矢量电流。

$$\begin{cases} \vec{i}_r = \frac{2}{3}(i_a + ai_b + a^2 i_c) \\ \vec{v}_c = \frac{2}{3}(U_{ca} + aU_{cb} + a^2 U_{cc}) \\ \vec{i}_o = \frac{2}{3}(i_{oa} + ai_{ob} + a^2 i_{oc}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: i_a, i_b, i_c 为三相四开关变换器电感电流; U_{ca}, U_{cb}, U_{cc} 表示电容电压; i_{oa}, i_{ob}, i_{oc} 表示负载三相电流; 电流空间矢量 \vec{i}_o 视为不确定变量, 会随着负载的变化而变化, \vec{i}_r, \vec{v}_c 视为状态变量, $\vec{i}_o, \vec{i}_r, \vec{v}_c$ 分别通过传感器测得。定义系统状态空间矢量方程为

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = A\vec{x} + B_u \vec{v}_i + B_d \vec{i}_o \quad (11)$$

式(11)中:

$$x = \begin{bmatrix} i_r \\ v_c \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} -R/L & -1/L \\ 1/C & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_u = \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \quad B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ -1/C \end{bmatrix}$$

滤波器电容电压 \vec{v}_c 状态方程为

$$\vec{v}_c = [0 \ 1] \vec{x} \quad (12)$$

以 T_s 为采样时间, 离散式(11)为

$$\vec{x}(k+1) = A_q \vec{x}(k) + B_{uq} \vec{v}_i(k) + B_{dq} \vec{i}_o(k) \quad (13)$$

式(13)中 A_q, B_{uq}, B_{dq} 分别为系统状态离散矩阵:

$$A_q = e^{A^T T_s} \quad B_{uq} = \int_0^{T_s} e^{\tau A} B_u d\tau$$

$$B_{dq} = \int_0^{T_s} e^{A\tau} B_d d\tau$$

根据式(12)和式(13)计算滤波器电容电压空间矢量预测模型:

$$\vec{v}_c(k+1) = [0 \quad 1] [A_q \vec{x}(k) + B_{uq} \vec{v}_i(k) + B_{dq} \vec{i}_o(k)] \quad (14)$$

3 考虑直流侧分离电容电压均衡的模型预测电压控制

3.1 模型预测电压控制原理

模型预测电压控制如图 3 所示, U_1 表示系统给定电压, U_2 表示四种开关状态对应的预测电压, U_3 表示最优开关状态对应的输出电压, T_s 为采样周期。理想情况下, t_k 时刻采集滤波器电感电流 $\vec{i}_l(k)$ 、电容电压 $\vec{v}_c(k)$ 、负载侧电流 $\vec{i}_o(k)$ 与逆变器输出电压 $\vec{v}_i(k)$ 。以 t_k 时刻为基础, 经式(14)预测 t_{k+1} 时刻四种开关状态下电容电压 $\vec{v}_c(k+1)$ 。并经价值函数 g 进行比较, 选择最优开关状态进行输出。

对四种开关状态下预测电压进行比较, 选择最优矢量, 基于 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系建立代价函数 g 如式(15)。

$$g = |e_\alpha^* - U_\alpha(k+1)| + |e_\beta^* - U_\beta(k+1)| \quad (15)$$

式中, $U_\alpha(k+1)$ 、 $U_\beta(k+1)$ 分别为系统在 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下给定电压与电容预测电压。

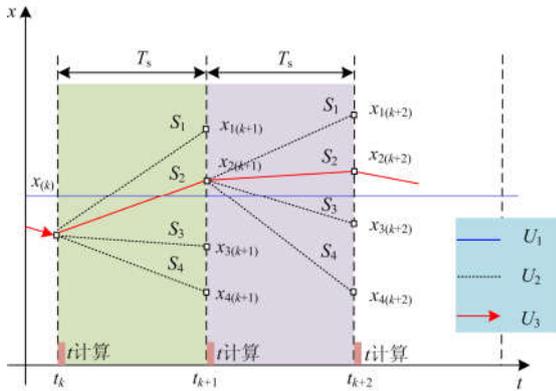


图 3 模型预测电压控制

Fig. 3 Model predictive voltage control

3.2 直流侧分离电容电压建模与分析

假设 a 相故障如图 1 所示, 根据 KCL 原理, 开关状态 S_i ($i = b, c$) 与电流 i_b 、 i_c 、 i_{dc} 共同表示直流侧电容 C_1 、 C_2 电流 i_{dc1} 、 i_{dc2} 为

$$\begin{cases} i_{dc1} = i_b \cdot S_b + i_c \cdot S_c - i_{dc} \\ i_{dc2} = i_b \cdot (1 - S_b) + i_c \cdot (1 - S_c) + i_{dc} \end{cases} \quad (16)$$

电容电流 i_{dc1} 、 i_{dc2} 可表示为

$$\begin{cases} C \frac{dU_{dc1}}{dt} = -i_{dc1} \\ C \frac{dU_{dc2}}{dt} = i_{dc2} \end{cases} \quad (17)$$

对电容电压 U_{dc1} 与 U_{dc2} 差值微分, 可得故障相电流 i_a :

$$C \frac{d(U_{dc2} - U_{dc1})}{dt} = -(i_{dc1} + i_{dc2}) = i_a \quad (18)$$

式(18)积分为

$$\Delta U_{dc} = \frac{1}{C} \int_k^{k+1} i_a + (U_{dc1}(k) - U_{dc2}(k)) \quad (19)$$

式中, $U_{dc1}(k)$ 、 $U_{dc2}(k)$ 分别为电容 C_1 、 C_2 电压初始值。电容电压偏差由相电流积分和电容初始电压差值共同决定。采用低通滤波器提取电容电压偏差:

$$\Delta \bar{U}_{dc} = U_{dc1}(k) - U_{dc2}(k) \quad (20)$$

当直流侧中点电压不平衡时, 对 a 相补偿直流偏置电流 \vec{i}_a , 消除电容电压偏差。

$$\begin{cases} \vec{i}_a = k_v \Delta \bar{U}_{dc} \\ \Delta U_{dc} = \frac{1}{C} \int_k^{k+1} (i_a + \vec{i}_a) + (U_{dc1}(k) - U_{dc2}(k)) \end{cases} \quad (21)$$

式(21)中, k_v 为比例控制器系数。

离网逆变器电容电压均衡控制结构如图 4。 t_k 时刻分别采集电感电流 $\vec{i}_l(k)$ 、电容电压 $\vec{v}_c(k)$ 、负载侧电流 $\vec{i}_o(k)$, 并对其进行 Clark 变换, 分别为 $i_{a1}(k)$ 、 $i_{\beta 1}(k)$ 、 $U_\alpha(k)$ 、 $U_\beta(k)$ 、 $i_\alpha(k)$ 、 $i_\beta(k)$ 。变换器输出电压 $\vec{v}_i(k)$ 由 t_k 时刻的开关状态和直流侧电容电压计算得出, 经过 Clark 变换为 $u_\alpha(k)$ 、 $u_\beta(k)$ 。

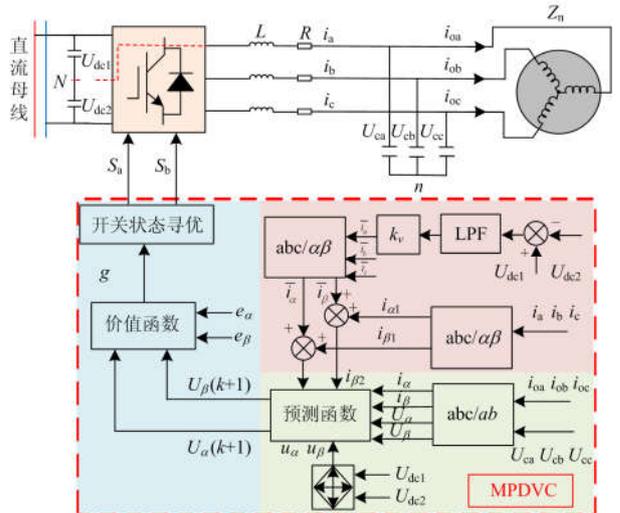


图 4 离网变换器电容电压均衡控制结构

Fig. 4 Capacitive voltage balancing control structure for island mode

当直流母线中点电压不平衡时, 对电容电压偏差值通过二阶低通滤波器提取偏差分量, 并经过比例调节器提取电流直流分量 \bar{i}_α 、 \bar{i}_β , 加入到电感电流 $i_{\alpha 1}$ 、 $i_{\beta 1}$ 中, 得出补偿电流值 $i_{\alpha 2}$ 、 $i_{\beta 2}$ 如式(22)。采集电感电流 $\bar{i}_i(k)$ 、电容电压 $\bar{v}_c(k)$ 、负载侧电流 $\bar{i}_o(k)$ 结合变换器输出电压 $\bar{v}_i(k)$, 经预测函数式(14)计算出 t_{k+1} 时刻滤波器电容电压 $u_\alpha(k+1)$ 、 $u_\beta(k+1)$ 。并带入价值函数式(15)中, 实现分离电容电压均衡控制。

$$\begin{cases} i_{\alpha 2} = \bar{i}_\alpha + i_{\alpha 1} \\ i_{\beta 2} = \bar{i}_\beta + i_{\beta 1} \end{cases} \quad (22)$$

4 仿真结果

为验证所提控制策略的有效性, 设计三相四开关变换器 Matlab 仿真模型, 通过改变系统功率与负载性质检验控制策略的效果, 系统参数如表 3。

表 3 系统参数

Table 3 System parameter

参数	数值
直流侧电压 $U_{dc1}, U_{dc2}/V$	200
直流侧电容 $C/\mu F$	1 500
滤波电感 L/mH	3
滤波电容 $C/\mu F$	40
电感电阻 r/Ω	0.1
给定电压 e/V	110
有功功率 P/W	1 000
无功功率 Q/var	0
采样频率 f/Hz	20 k
参考频率 f_{ref}/Hz	50

4.1 系统加入线性负载仿真结果

系统不使用电容电压均衡控制如图 5, 给定直流母线电容 C_1 、 C_2 初始电压分别为 250 V、150 V, 负载侧给定功率 $P_{ref}=1$ kW、 $Q_{ref}=0$ var, 三相电流 THD 为 4.03%, 三相电压 THD 为 1.07%。负载侧功率稳定。由于直流母线中点电压不平衡, 电容器处于非正常工作状态, 易造成电容过电压运行故障, 降低电容使用寿命。

系统加入中点电压平衡控制如图 6。直流侧电容 C_1 、 C_2 电压值, 在控制策略的作用下趋于均衡。三相电压幅值均衡, 电感电流 THD 从 4.03%降至 3.17%, 电容电压 THD 从 1.07%降至 0.19%, 负载侧功率平稳。

为了进一步验证所提控制策略的动态特性, 在负载变化条件下进行仿真。系统在直流母线中点电压平衡控制前, 设置直流侧电容 $C_1=250$ V、 $C_2=150$ V, 负载侧在 0.1 s、0.2 s、0.3 s 时刻分别给定有功功率

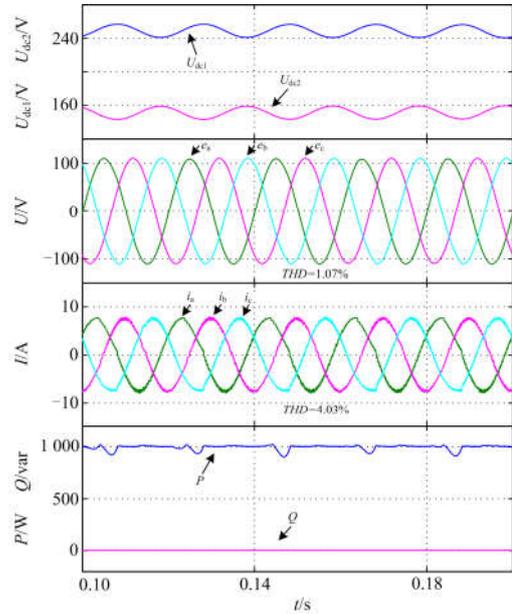


图 5 离网模式下模型预测控制仿真

Fig. 5 Simulation results of model predictive control in island model

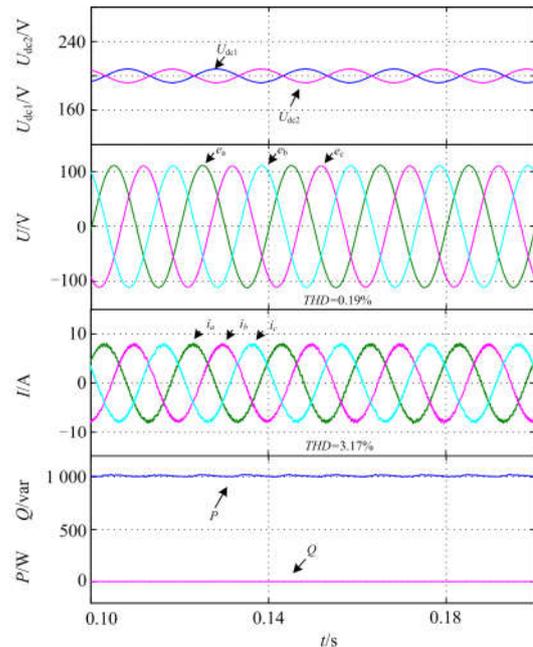


图 6 离网模式下考虑中点电压平衡的模型预测控制仿真

Fig. 6 Simulation results of model predictive control considering midpoint voltage balancing in island model

$P_{ref}=1$ kW、 $P_{ref}=1.5$ kW、 $P_{ref}=2$ kW, 无功功率保持 $Q_{ref}=0$ var。仿真结果如图 7, 随着有功功率增加, 三相电流 THD 分别为 4.03%、5.06%、6.12%, 逐渐增加, 三相电压 THD 分别以 1.07%、2.77%、4.17% 递增。负载功率波形随着功率的递增, 波动逐渐增大。直流母线中点电压不平衡, 降低逆变器输出电

能质量, 直流侧电容工作于过电压条件下, 易于出现故障。

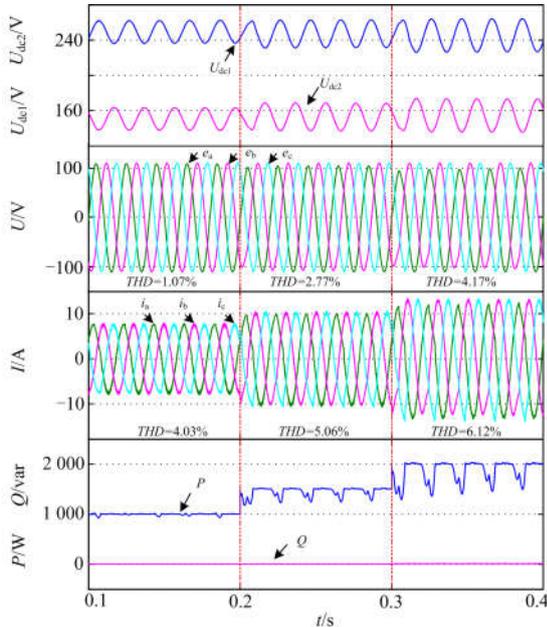


图 7 负载变化条件下模型预测控制仿真

Fig. 7 Simulation results of model predictive control under load changing conditions

系统加入分离电容电压均衡控制后仿真结果如图 8。直流侧电容 C_1 、 C_2 电压从电压差为 100 V,

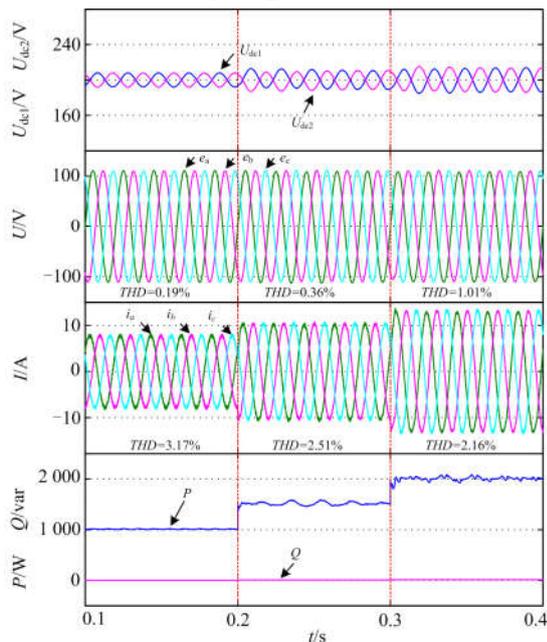


图 8 负载变化条件下考虑中点电压平衡的模型预测控制仿真

Fig. 8 Simulation results of model predictive control considering midpoint voltage balancing under load changing conditions

在控制策略的作用下趋于均衡。随着输出功率的增加, 直流侧分离电容中点电压保持平衡。三相电流 THD 分别为 3.17%、2.51%、2.16%, 略有递减, 三相电压 THD 分别以 0.19%、0.36%、1.01%递增。负载侧功率逐渐增加, 功率波形平滑稳定。

4.2 系统加入非线性负载仿真结果

为了检验所提控制策略在不同类型负载下的仿真结果, 系统加入非线性负载如图 9。

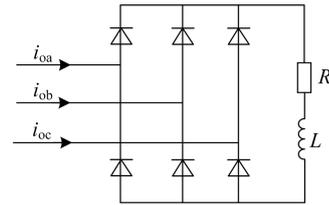


图 9 非线性负载

Fig. 9 Nonlinear load

设置直流侧电容 C_1 、 C_2 初始电压分别为 250 V、150 V, 负载侧给定功率 $P_{ref}=1$ kW、 $Q_{ref}=100$ var, 仿真结果如图 10。三相四开关变换器滤波器电容三相电压 THD 为 3.31%, 负载侧输出三相电流稳定。但是直流母线中点电压不平衡, 电容器易出现故障, 降低系统运行可靠性。

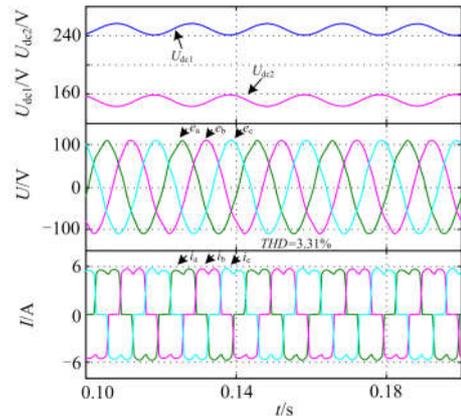


图 10 非线性负载条件下模型预测控制仿真

Fig. 10 Simulation results of model predictive control under nonlinear load conditions

系统加入中点电压平衡控制如图 11。直流侧电容 C_1 、 C_2 从电压差值为 100 V, 在控制策略的作用下趋于均衡。输出电压 THD 从 3.31%降至 1.86%, 同时也降低了因电容过电压导致二次故障的机率。

为了检测系统非线性负载下的动态特性, 在系统均衡控制前, 设置直流侧电容 $C_1=250$ V、 $C_2=150$ V, 负载侧在 0.1 s、0.2 s、0.3 s 时刻分别给定有功功率 $P_{ref}=1$ kW、 $P_{ref}=1.5$ kW、 $P_{ref}=2$ kW。仿真结果如图 12, 随着有功功率增加, 三相电压

THD 分别以 3.31%、6.07%、10.2% 递增, 负载侧三相电流平衡性逐渐变差, 直流侧电容中点电压不平衡。

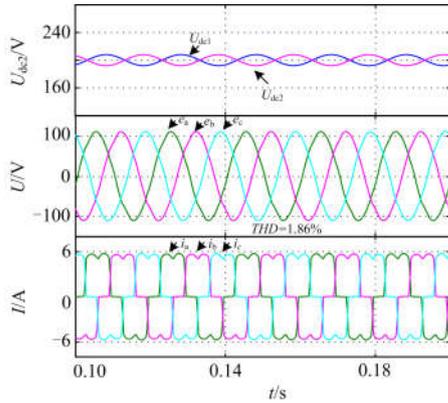


图 11 非线性负载条件下考虑中点电压平衡的模型预测控制仿真

Fig. 11 Simulation results of model predictive control considering midpoint voltage balancing under nonlinear load conditions

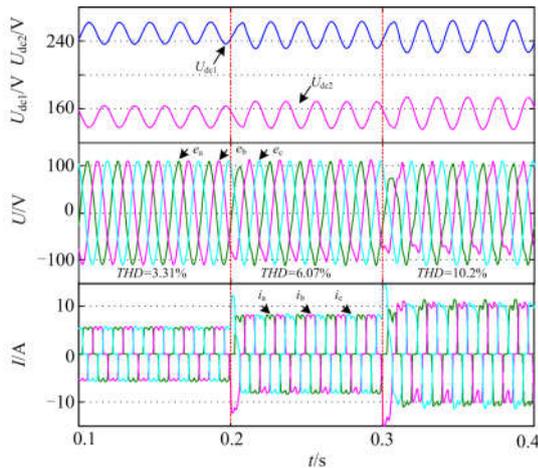


图 12 非线性负载变化条件下模型预测控制仿真

Fig. 12 Simulation results of model predictive control under nonlinear load changing conditions

系统使用中点电压平衡控制如图 13。直流侧电容 C_1 、 C_2 从电压差为 100 V, 在控制策略的作用下趋于均衡, 随着输出功率的增加, 直流侧分离电容中点电压保持平衡。三相四开关变换器电容三相电压 THD 分别为 1.86%、4.24%、7.77%, 逐渐递增, 三相电压 THD 与控制前相比明显减小, 三相电流保持平衡。系统运行良好, 同时也降低了因电容过电压导致二次故障的机率。

5 实验

为进一步验证所提控制策略的有效性, 进行相

关实验, 系统参数如表 3, 给定功率 $P_{ref} = -1$ kW、 $Q_{ref} = 0$ var。系统不使用电容均压控制, 实验结果如图 14。电流 THD 为 2.7%, 波形正弦度较好, 三相不平衡度 0.9%, 输出功率稳定, 然而, 电容电压不平衡, 电容电压 U_{dc1} 过大, 会影响电容使用寿命。

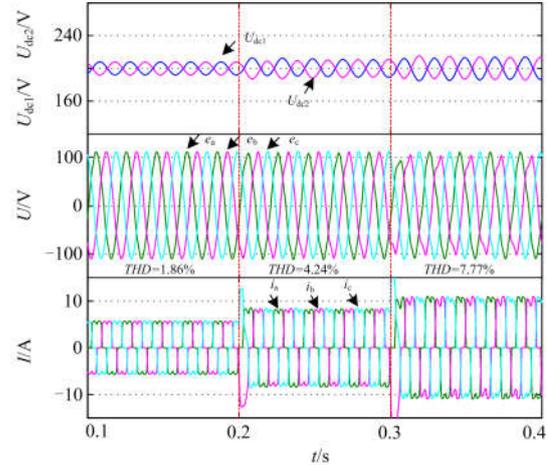


图 13 非线性负载变化条件下考虑中点电压平衡的模型预测控制仿真

Fig. 13 Simulation results of model predictive control considering neutral point voltage balance under nonlinear load changing conditions

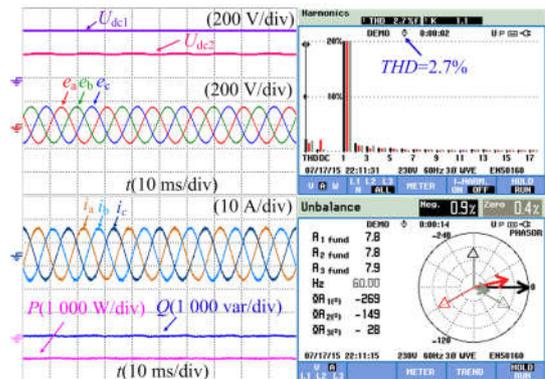


图 14 无均压控制模型预测控制实验

Fig. 14 Experiment results of model predictive control not considering neutral point voltage balance

系统加入本文设计的中点电压平衡控制策略, 实验结果如图 15。给定功率 $P_{ref} = 1$ kW、 $Q_{ref} = -1$ var, 电容 C_1 、 C_2 初始状态存在电压差, 在 t_0 时刻加入中点电压平衡控制, 电容 C_1 、 C_2 电压值趋近并保持均衡。 t_1 时刻给定功率 $P_{ref} = -1$ kW, 变换器由逆变模式切换至整流模式, 电容 C_1 、 C_2 电压值仍保持均衡, 输出功率稳定。验证了本文设计控制策略的有效性。

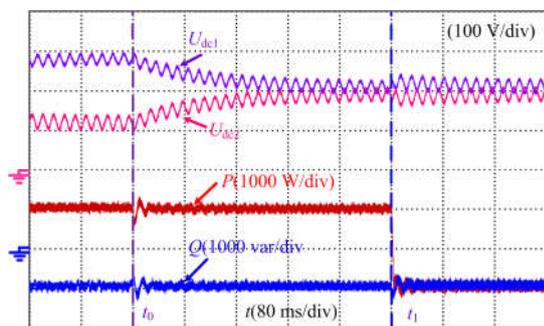


图 15 考虑中点电压平衡的模型预测控制实验

Fig. 15 Experiment results of model predictive control considering neutral point voltage balance

6 结论

为提高三相四开关容错变换器输出电能质量和可靠性,设计了一种考虑电容中点电压平衡的模型预测电压控制策略。取得以下进展及结论:(1)分析了容错变换器工作机制和电压矢量变化关系,建立了电压预测模型。(2)通过对故障相电流进行补偿,采用电压预测模型计算预测电压,经价值函数对四种电压矢量进行对比选择,输出最优开关状态。消除直流侧电容电压偏差,有效改善负载侧电能质量,实现直流侧电容电压均衡控制。(3)模型预测电压控制策略不需使用锁相环和空间电压矢量调制,易于实现。

参考文献

- [1] MIRSAEIDI S, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. Challenges, advances and future directions in protection of hybrid AC/DC microgrids[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(12): 1495-1502.
- [2] 刘喜梅, 戴雪梅, 李梅航. 基于微网技术的家庭能源管理系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 66-72.
LIU Ximei, DAI Xuemei, LI Meihang. Research on the home energy management system based on the microgrid technology[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 66-72.
- [3] EAJAL A A, ABDELWAHED M A, EL-SAADANY E F, et al. A unified approach to the power flow analysis of AC/DC hybrid microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1145-1158.
- [4] CHEN Xia, SHI Mengxuan, SUN Haishun, et al. Distributed cooperative control and stability analysis of multiple DC electric springs in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5611-5622.
- [5] YANG P, XIA Y, YU M, et al. A decentralized coordination control method for parallel bidirectional power converters in a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6217-6288.
- [6] WANG P, JIN C, ZHU D. Distributed control for autonomous operation of a three-port AC/DC/DS hybrid microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62: 1279-1290.
- [7] HAIDER S, LI Guojie, WANG Keyou. A dual control strategy for power sharing improvement in islanded mode of AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 111-118. DOI: 10.1186/s41601-018-0084-2.
- [8] 李林, 单喜斌, 宋宗勋. 基于 DFIG 控制方法的微电网的并网及孤岛运行方式分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 158-163.
LI Lin, SHAN Xibin, SONG Zongxun. Operation mode analysis of micro-grid grid-connected and island based on DFIG control method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 158-163.
- [9] 丁明, 史盛亮, 刘新宇, 等. 交直流混合微网优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 17-25.
DING Ming, SHI Shengliang, LIU Xinyu, et al. Study of optimal configuration of a hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 17-25.
- [10] 吴雨, 潘文霞, 冯蒙霜, 等. 基于混合储能的微电网功率控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 109-114.
WU Yu, PAN Wenxia, FENG Mengshuang, et al. Power control strategy for microgrid based on hybrid energy storage system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(2): 109-114.
- [11] ABBEY C, JOOS G. Effect of low voltage ride through (LVRT) characteristic on voltage stability[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 16-16, 2005, San Francisco, CA, USA: 1901-1907.
- [12] ZHANG W P, XU D H, ENJETI P N, et al. Survey on fault-tolerant techniques for power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6319-6331.
- [13] 安群涛, 孙醒涛, 赵克, 等. 容错三相四开关逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 14-20.
AN Quntao, SUN Xingtiao, ZHAO Ke, et al. Control strategy for fault-tolerant three-phase four-switch inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 14-20.
- [14] 刘勇超, 葛兴来, 蒲俊楷, 等. 四开关三相逆变器全调制范围内两种等效 PWM 算法[J]. 电工技术学报, 2010, 35(12): 2453-2458.

- 2017, 32(2): 206-215.
- LIU Yongchao, GE Xinglai, PU Junkai, et al. Two types of equivalent PWM algorithms in the full modulation region for four-switch three-phase inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 206-215.
- [15] 滕青芳, 靳宇星, 李姝媛, 等. 基于MRAS观测器的三相四开关逆变器驱动 PMSM 系统模型预测电流控制[J]. 信息与控制, 2017, 46(2): 165-171.
- TENG Qingfang, JIN Yuxing, LI Shuyuan, et al. Model predictive current control for PMSM systems driven by a three-phase four-switch inverter based on a MRAS observer[J]. Information and Control, 2017, 46(2): 165-171.
- [16] 侯世英, 宋星, 孙韬, 等. 基于空间矢量滞环控制的新型容错三相四开关并网逆变器[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 138-144.
- HOU Shiyang, SONG Xing, SUN Tao, et al. A novel topology of fault-tolerant three-phase four-switch grid-connected inverter based on space vector hysteresis control[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 138-144.
- [17] MORREN J, DE HAAN S W H. Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.
- [18] FREIRE N M A, CARDOSO A J M. A fault-tolerant direct controlled PMSG drive for wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(2): 821-834.
- [19] 郑玮仪, 曾志勇, 赵荣祥. 容错型三相并网变换器的建模分析与矢量调制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2202-2212.
- ZHENG Weiyi, ZENG Zhiyong, ZHAO Rongxiang. Modeling and modulation of the fault-tolerant grid-connected three-phase PWM converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2202-2212.
- [20] 谭兴国, 王辉, 张黎, 等. 具有电压补偿的四开关并网逆变器等效 SVPWM 控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 1-8.
- TAN Xingguo, WANG Hui, ZHANG Li, et al. An equivalent SVPWM control method with voltage compensation for four-switch inverter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 1-8.

收稿日期: 2018-07-18; 修回日期: 2018-09-28

作者简介:

王永辉(1974—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子系统可靠性与模型预测控制; E-mail: 499653451@qq.com

何帅彪(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子系统可靠性与模型预测控制; E-mail: 1053811975@qq.com

冯瑾涛(1980—), 男, 本科, 工程师, 从事光伏发电设备及电动汽车充换电设备的产品检验及标准研究工作。

(编辑 葛艳娜)