

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190947

电容分裂式变换器模型预测三相不平衡治理策略

安小宇¹, 张涛¹, 李琰琰¹, 王军², 雍韬², 金楠¹

(1. 郑州轻工业大学电气信息工程学院, 河南 郑州 450002;
2. 国网河南省电力公司三门峡供电公司, 河南 三门峡 472000)

摘要: 针对电网三相不平衡条件下三相四线制配电系统产生负序以及零序电流的问题, 选择电容分裂式变换器为研究对象, 提出一种模型预测电流控制策略。首先, 通过坐标变换构建 $\alpha\beta 0$ 坐标下逆变器输出电流的预测模型。其次, 基于瞬时无功理论的参考补偿分量检测方法直接计算出零序参考电流。最后, 利用价值函数对逆变器输出的不同电压矢量进行评估, 选择使价值函数值最小的最优电压矢量并应用于下一采样周期, 实现目标电流补偿。所提出的控制策略能够有效降低电网三相不平衡度, 补偿三相负载不平衡产生的零序电流, 提高了电网电能质量及系统运行性能。仿真与实验结果表明所提出的控制策略在电网不平衡条件下的有效性。

关键词: 电容分裂式变换器; 三相不平衡; 模型预测控制; 电能质量治理

Model predictive three phase unbalance controlling strategy for split capacitor converter

AN Xiaoyu¹, ZHANG Tao¹, LI Yanyan¹, WANG Jun², YONG Tao², JIN Nan¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
2. Sanmenxia Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Sanmenxia 472000, China)

Abstract: The paper aims to solve the problems of negative-sequence and zero-sequence current of the three-phase four-wire power distribution system under three phase unbalance of a power grid. A model predictive current control strategy is proposed which chooses a capacitor split converter as the research object. First, a prediction model of the inverter output current under $\alpha\beta 0$ coordinates is constructed via coordinate transformation. Secondly, the zero-sequence reference current is calculated directly using a reference compensation component detection method based on instantaneous reactive power theory. Finally, the different voltage vectors output by the inverter are evaluated by applying the value function. The optimal voltage vector which makes the value function a minimum is selected and then applied to the next sampling period to realize target current compensation. The proposed control strategy effectively reduces the three-phase unbalance of the power grid, compensates the zero-sequence current generated by three-phase load imbalance, and improves the power quality of the power grid and system operation performance. The simulation and experimental results show the effectiveness of the proposed control strategy under power grid imbalance.

This work is supported by Youth Science Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51607159 and No. 51707176).

Key words: split capacitor converter; three phase unbalance; model predictive control; power quality control

0 引言

近年来, 随着经济及工业技术的迅速发展, 民用及工业用电对电能质量的要求日益提高^[1-6], 变换

器作为交直流混合微电网的重要组成部分受到了广大学者的关注。为了满足电网不平衡工况下的并网要求, 变换器的控制策略至关重要^[7-9]。

由于三相不对称负荷及大量单相负载不断增加, 使得每个相序在中性线积累大量零序电流, 给电网系统带来严重的电能质量污染, 增加了线路损耗。配电网三相电流不平衡主要是由三相负载不对称引起, 各相负载为电力系统中的扰动变量, 负载时刻在变化, 一些较大容量单相负荷切入或退出会

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目资助(51607159, 51707176); 河南省高等学校科技创新人才支持计划项目资助(18HASTIT025); 河南省高等学校重点科研项目资助(18A470020, 20A470011)

加剧三相不平衡度。因此, 选择有效的控制策略治理电能质量, 减少三相负载不平衡度, 降低电力网络电能损耗, 提高功率因数, 提供安全可靠、优质经济的电能, 是当前研究的热点问题^[10-11]。

目前国内外学者针对三相三线制配电网中不对称负荷补偿问题的研究已经相当成熟, 研究重点以补偿负序电流为主要目标, 从而提高电能质量。文献[12]针对三相四线制补偿精度问题, 将重复控制器与 PI 控制策略相结合, 能够提升电流的追踪效果, 但两个控制方法之间会相互耦合, 增加控制的复杂度。文献[13]提出具有电压补偿的等效 SVPWM 补偿算法, 有效抑制变换器输出不均衡问题, 但实现过程较为复杂。文献[14]基于 PI 控制器和电压空间矢量调制算法, 提出确定矢量空间区间的“旋转坐标系”, 使得变换器的补偿效果更理想, 但其中扇区选择算法繁琐。文献[15]建立电网不平衡下同步旋转坐标系的数学模型, 提出比例谐振功率控制策略, 改善系统动态和稳态性能。

由于三相三线制系统本身不存在零序电流, 所以传统的补偿方式不能够有效补偿三相四线制配电系统中产生的零序电流。在实际系统中如果继续采用传统的矢量控制, 对变换器的输出性能影响较大, 电流出现畸变, 电能质量大大降低, 这无疑给并网电能质量带来负面影响^[16]。

针对上述问题, 本文以电容分裂式变换器为研究对象, 提出了一种模型预测电流不平衡治理策略。首先, 对三相四线制电容分裂式变换器工作原理进行分析, 阐明其开关状态与输出电压的关系, 并建立预测电流模型; 其次, 基于瞬时功率理论对不平衡电流进行计算, 采用 $i_p-i_q-i_0$ 电流检测方法对目标电流进行提取, 并计算出基波零序电流及下一时刻的预测电流; 最后, 在 $\alpha\beta$ 坐标下设计电流预测模型, 利用价值函数对逆变器输出的不同电压矢量进行评估, 选择使价值函数取得最小值的电压矢量, 将对应的开关状态应用于下一采样周期。通过仿真和实验验证了所提模型预测电流控制策略对三相四线制电容分裂式变换器控制的有效性和实用性^[17-23]。

1 三相四线制电容分裂式变换器工作原理及数学模型

三相四线制电容分裂式变换器是一个三相相互独立的非耦合系统, 可以将其等效为三个独立的单相半桥逆变电路, 其直流侧电容中点与三相电网系统的中性线相连接, 形成中线电流回路, 通过引出线补偿所需的基波零序电流, 以消除或减少电网中

三相电流不平衡度。三相四线制电容分裂式变换器结构如图 1 所示。

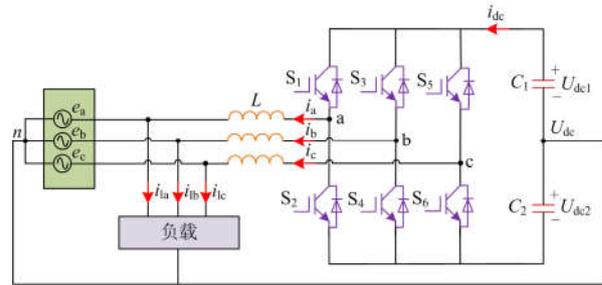


图 1 电容分裂式变换器结构

Fig. 1 Structure of split capacitor converter

如图1所示, e_a 、 e_b 、 e_c 为三相电网电压, n 为中性点, U_{dc1} 、 U_{dc2} 分别为直流侧上下电容的采样电压。 C_1 、 C_2 分别为直流侧的两个串联电容, 起稳压和滤波作用, L 为逆变器侧滤波电感, 通过在直流侧上下电容器的中点引出一条通路作为零序电流的补偿方式。

根据基尔霍夫定律, 得到变换器在 abc 三相静止坐标系下的状态方程为

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_{an} 、 u_{bn} 、 u_{cn} 为变换器输出三相电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为输出三相电流; e_a 、 e_b 、 e_c 为三相电网电压。

对式(1)进行 Clark 变换, 得到 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下的状态方程:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, i_α 、 i_β 、 u_α 、 u_β 、 e_α 、 e_β 分别为逆变器输出电流、电压和电网电压的 α 、 β 分量。

定义变换器的开关状态 S_i ($i=a, b, c$) 如下:

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

令开关状态矢量 \mathbf{S} 为

$$\mathbf{S} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_{dc}}{2} (S_a + aS_b + a^2S_c) \quad (4)$$

式中, $a = e^{j2\pi/3}$, 逆变器输出电压矢量 \mathbf{U} 为

$$\mathbf{U} = \sqrt{\frac{2}{3}} (u_{an} + au_{bn} + a^2u_{cn}) \quad (5)$$

式中, u_{an} 、 u_{bn} 、 u_{cn} 为逆变器输出对中性点 n 的电压。对式(5)进行 Clark 变换, 得到 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下变换器输出电压与开关状态的表达式:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{6}U_{dc}}{6} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

对式(2)进行离散化, 得

$$\frac{L}{T_s} \begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) - i_\alpha(k) \\ i_\beta(k+1) - i_\beta(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha(k) \\ u_\beta(k) \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_\alpha(k) \\ i_\beta(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_\alpha(k) \\ e_\beta(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, T_s 为采样周期。

化简式(7), 得 t_{k+1} 时刻的预测电流为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) \\ i_\beta(k+1) \end{bmatrix} = \frac{T_s}{L} \begin{bmatrix} u_\alpha(k) - e_\alpha(k) \\ u_\beta(k) - e_\beta(k) \end{bmatrix} + \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) \begin{bmatrix} i_\alpha(k) \\ i_\beta(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $i_\alpha(k)$ 、 $i_\beta(k)$ 、 $u_\alpha(k)$ 、 $u_\beta(k)$ 分别为 t_k 时刻变换器输出电流、电压的 α 、 β 分量; $e_\alpha(k)$ 、 $e_\beta(k)$ 分别为 t_k 时刻电网电压的 α 、 β 分量; $i_\alpha(k+1)$ 、 $i_\beta(k+1)$ 分别为 t_{k+1} 时刻预测电流值的 α 、 β 分量。

2 不平衡电流检测及零序电流计算

基于瞬时功率理论的 i_p - i_q - i_0 电流检测方法, 在三相四线制系统中需要考虑零序电流的影响, 否则零序电流无法补偿。abc 三相电网电压通过 PLL 锁相环和正余弦信号发生器得到与基波同步变化的变换矩阵 C_{pq0} , 三相静止的 abc 坐标系经过变换得到和基波磁场、同步角速度相同方向的 α - β -0 旋转坐标系的变换矩阵为 $C_{\alpha\beta 0}$, 由此可计算出 i_p 、 i_q 、 i_0 为

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\cos \omega t & -\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

得到的公式在三相四线系统中任何情况都成立, 包括系统电压畸变和不平衡负载的情况。

如图 2 所示, 通过低通滤波器 LPF 获取有功直流量 \bar{i}_p , 根据对式(9)求逆得到的基波正序有功电流 i_{Lap} 、 i_{Lbp} 、 i_{Lcp} , 将求得基波正序有功电流从总的负载电流 i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 中减去, 即为检测的目标补偿电流 i_{aref} 、 i_{bref} 、 i_{cref} 。

根据 Clark 变换得到零轴电流 $i_0(k)$ 为

$$i_0(k) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} i_a + \frac{1}{\sqrt{2}} i_b + \frac{1}{\sqrt{2}} i_c \right) \quad (10)$$

α 轴的电流分量为

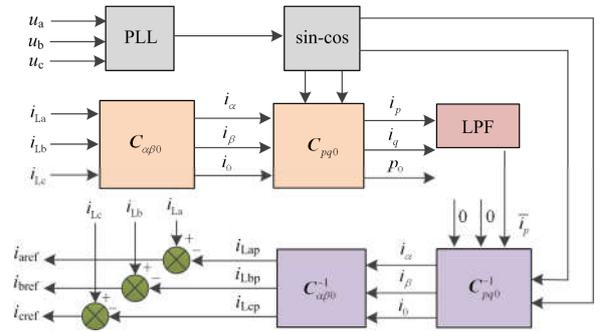


图 2 不平衡电流检测框图

Fig. 2 Block diagram of unbalanced current detection

$$i_\alpha(k) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \left(i_a - \frac{1}{2} i_b - \frac{1}{2} i_c \right) \quad (11)$$

联立式(10)、式(11)可得零序电流为

$$i_0(k) = \sqrt{3} i_a - \sqrt{2} i_\alpha \quad (12)$$

在 $k+1$ 时刻零序电流为

$$i_0(k+1) = \sqrt{3} i_\alpha(k) - \sqrt{2} \left[\left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i(k) + \frac{T_s}{L} (u(k+1) - e(k+1)) \right] \quad (13)$$

3 电容分裂式变换器模型预测控制策略

模型预测控制策略结构如图3所示。模型预测控制是一种基于离散时间模型的闭环优化控制策略, 该算法可预测下一时刻的动态模型, 重复计算并依次执行控制动作和误差反馈矫正。首先采集网测电压 e_a 、 e_b 、 e_c 和电流 i_a 、 i_b 、 i_c , 经过 Clark 变换分别得到预测模型所需要的各个参数 e_α 、 e_β 、 i_α 、 i_β , 三相参考电流 i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^* 经过坐标变换后得到 $\alpha\beta$ 坐标系下的参考电流 i_{aref} 、 i_{bref} 。预测函数输出不同电压矢量对应的下一时刻可能出现的 $i_\alpha(k+1)$ 、 $i_\beta(k+1)$, 通过瞬时功率理论得到目标补偿电流, 并计算出基波零序参考电流为 i_{0ref} , 下一时刻预测电流为 $i_0(k+1)$ 。参考值和各个预测电流值通过价值函数进行比较, 通过价值函数选择出使得函数取得最小值的最优电压矢量开关状态 S_a 、 S_b 、 S_c , 应用于 t_{k+1} 时刻, 实现模型预测电流控制。

基于 $\alpha\beta$ 坐标系下用于电容分裂式变换器的模型预测电流控制, 选择参考值和预测电流误差的绝对值之和作为价值函数, 考虑零序电流的价值函数 g 如式(14)所示。

$$g = |i_{aref} - i_\alpha(k+1)| + |i_{bref} - i_\beta(k+1)| + \lambda_0 |i_{0ref} - i_0(k+1)| \quad (14)$$

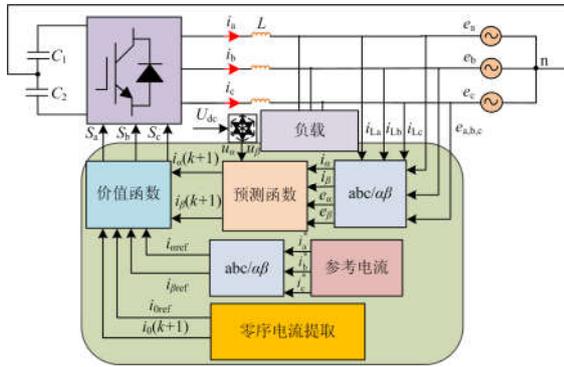


图3 三相四线制电容分裂式模型预测控制结构

Fig. 3 Model predictive control structure of three-phase four-wire capacitor split converter

式中： i_{aref} 、 i_{bref} 分别为 t_{k+1} 时刻 $\alpha\beta$ 坐标系下的参考电流分量； $i_{a(k+1)}$ 、 $i_{b(k+1)}$ 分别为 t_{k+1} 时刻电流预测值在 $\alpha\beta$ 坐标系下的分量； λ_0 为权重系数，使总的零序电流达到每相需要的零序电流。

依据电容分裂式变换器的开关状态，对应8种电压矢量，其逆变器输出电流不同。模型预测控制策略基本原理如图4所示，在 t_k 时刻采集系统变量 $x(k)$ ，通过预测模型计算得到下一时刻的预测值，使输出量尽快接近参考值 x^* ，用系统离散时间模型去预测每一个开关状态 S_n ($n=1,2,3,\dots,n$)所对应的变量结果 $x_{n(k+1)}$ ($n=1,2,3,\dots,n$)。在图4中，在 t_k 时刻 S_2 对应的 $x_{n(k+1)}$ 与参考值 x^* 最接近，故在 t_k 时刻 S_2 被选择并应用到下一时刻。同理，在 t_{k+1} 时刻， $x_{2(k+2)}$ 与参考值 x^* 最为接近，因此在 t_{k+1} 时刻开关状态 S_3 被选择应用到下一周期。

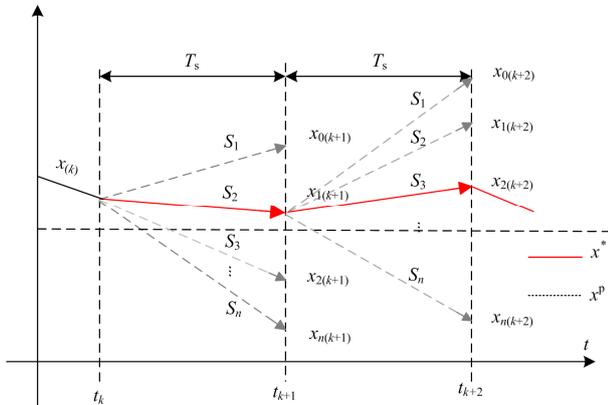


图4 模型预测控制原理

Fig. 4 Principle of model predictive control

4 仿真结果

为了验证模型预测电流控制策略在电网不平衡条件下的控制效果，在上下电容中点均压条件下进

行模型预测控制算法仿真实验，验证模型预测控制策略对电容分裂式变换器的控制性能，并对其进行了仿真分析。三相电流不平衡度是衡量电能质量的重要指标，电流不平衡度 I_ϕ 简化公式如下：

$$I_\phi = \frac{\text{Max}(|i_a - i_{\text{avg}}|, |i_b - i_{\text{avg}}|, |i_c - i_{\text{avg}}|)}{i_{\text{avg}}} \quad (15)$$

式中， i_{avg} 为三相相电流的平均值，仿真参数如表1。

表1 系统参数

Table 1 System parameter

参数	数值
直流侧电压 U_{dc1}, U_{dc2}	400 V
直流侧电容 C	1 000 μF
滤波电感 L	4 mH
a相阻抗 r	10 Ω +200 mH
b相阻抗 r	13 Ω +225 mH
c相阻抗 r	11 Ω +117 mH
电网电压 e	100 V
采样频率 f	10 kHz
参考频率 f_{ref}	50 Hz

图5为单相负载不平衡模型预测控制的仿真结果，三相电网电压波形如图5(a)所示，无补偿前单相负载不平衡电流如图5(b)所示，由于c相负载过重导致其c相负载电流跌落，补偿前三相电流 $i_a=4.8$ A， $i_b=4.9$ A， $i_c=4$ A，不平衡度为12.4%；补偿后

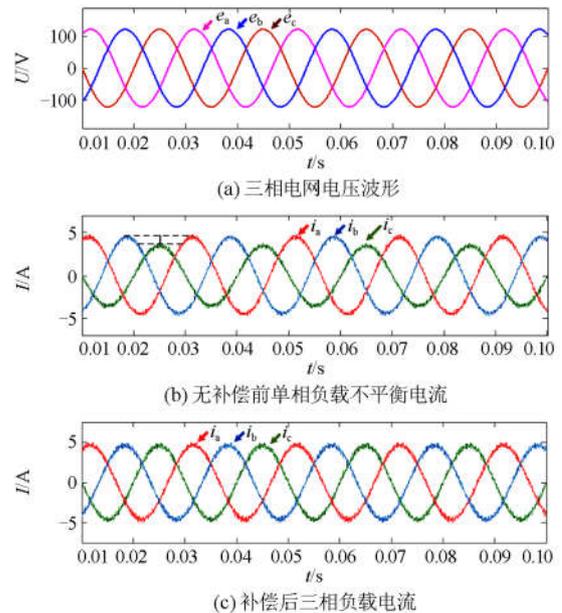


图5 单相不平衡模型预测控制的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of single-phase unbalance model predictive control

三相负载电流如图 5(c)所示, $i_a=4.9\text{ A}$, $i_b=4.95\text{ A}$, $i_c=4.97\text{ A}$, 带有零序补偿电流能快速跟踪 c 相参考电流, 并使三相电流达到稳定, 电流不平衡度为 0.08%。

图 6 为三相负载不平衡模型预测控制的仿真结果。三相电网电压波形如图 6(a)所示, 无补偿前单相负载不平衡电流如图 6(b)所示, $i_a=5.2\text{ A}$, $i_b=4.5\text{ A}$, $i_c=4\text{ A}$, 将 abc 相设置为不同阻感性负载, 导致其三相负载电流不平衡, 无补偿前三相电流不平衡度为 12%; 补偿后三相负载电流如图 6(c)所示, $i_a=4.95\text{ A}$, $i_b=5\text{ A}$, $i_c=4.9\text{ A}$, 电流不平衡度为 0.01%, 仿真表明, 该控制策略使得三相电流基本达到平衡, 三相不平衡度明显降低。变换器在三相负载不平衡条件下仍能保证正常运行, 并且电流波形正弦度良好, 通过仿真验证了所提控制策略的有效性。

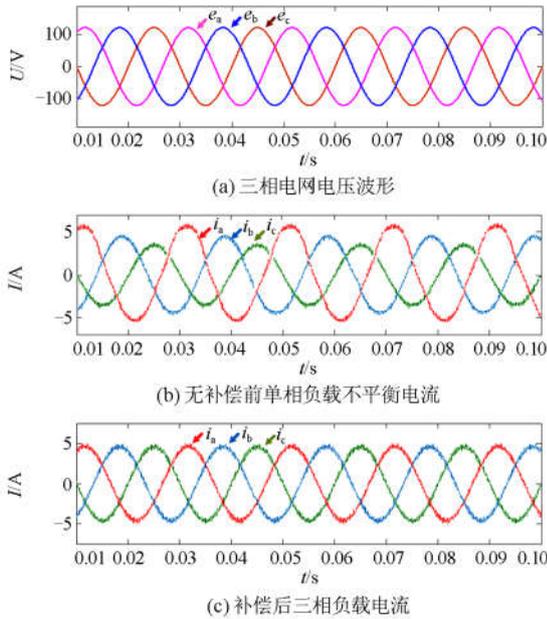


图 6 三相不平衡模型预测控制的仿真结果
Fig. 6 Simulation results of three-phase unbalance model predictive control

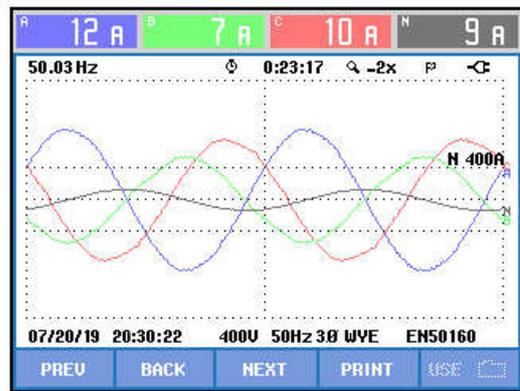
5 实验结果

为了验证电容分裂式变换器的电能质量综合补偿效果, 搭建实验平台如图 7 所示。考虑在网侧电压不变的情况下, 通过模型预测控制策略补偿不平衡时的基波电流, 将 abc 相阻感负载设置为不平衡。实验波形由 Fluke-F435 电能质量分析仪录制, 平台采用三相电子负载 Chroma 63804 模拟三相负载不平衡工况。实验装置参数与仿真一致, 如表 1 所示。

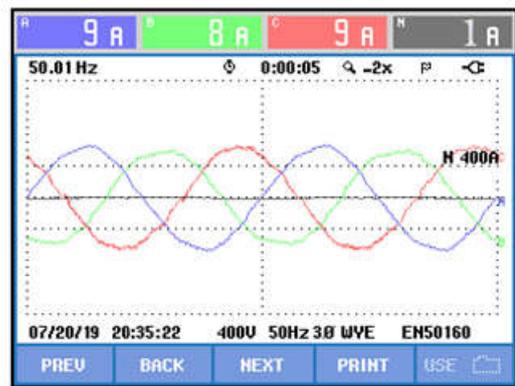


图 7 实验平台
Fig. 7 Experimental setup

图 8(a)为补偿前的电网电流实验波形, 补偿前三相电流 $i_a=12\text{ A}$, $i_b=7\text{ A}$, $i_c=10\text{ A}$, 三相电流不平衡度为 27.5%, 中线零序电流幅值为 9 A, 电网电流滞后电压一定的角度, 系统供电电能质量相对较差, 不利于电网的安全、经济运行。采用模型预测电流控制策略补偿负序零序电流, 图 8(b)为补偿后的电网电流实验波形, $i_a=9\text{ A}$, $i_b=8\text{ A}$, $i_c=9\text{ A}$, 三相电流不平衡度为 0.07%, 中线零序电流为 1 A, 三相负载电流基本达到了平衡。实验结果表明, 该控制策略对于电容分裂式变换器结构具有较好的补偿不平衡电流的能力, 系统有功不平衡和无功电流



(a) 补偿前三相电流波形



(b) 补偿后三相电流波形

图 8 实验结果

Fig. 8 Experimental result

的含量进一步减小, 系统功率因数增加, 提高了电网的电能质量。

6 结论

本文通过理论分析和仿真实验得出以下结论:

1) 建立电容分裂式变换器电流预测模型并对其控制问题进行研究, 在三相不平衡负载下, 为了消除三相电流不平衡, 建立了 $\alpha\beta$ 坐标系下预测电流数学模型, 通过预测函数得到下一时刻逆变器在不同电压矢量作用下所有可能输出的预测电流值, 选择使价值函数取得最小的电压矢量并应用于下一采样周期, 使逆变器输出电流快速逼近给定参考值。

2) 通过瞬时功率理论参考补偿分量的检测方法, 对不平衡电流进行检测提取, 采用 $i_p-i_q-i_0$ 电流检测方法对目标电流进行提取, 并计算出基波零序电流及下一时刻的预测电流。

3) 根据模型预测电流控制原理搭建了 Simulink 仿真与实验平台, 仿真与实验结果表明在三相负载不平衡条件下, 所提出的模型预测控制策略具有良好的补偿效果, 验证了电能质量治理的有效性, 具有一定的工程应用价值。

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] 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.
- [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] 王存平, 尹项根, 熊卿, 等. 一种改进的 ip-iq 无功电流检测方法及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 121-126.
WANG Cunping, YIN Xianggen, XIONG Qing, et al. An improved ip-iq reactive current detecting method and its application[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 121-126.
- [9] 吕晓琴, 章春军, 张秀峰. 三相不对称系统任意次谐波电流检测新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 93-96.
LÜ Xiaoqin, ZHANG Chunjun, ZHANG Xiufeng. A new algorithm for random harmonic current detection under unbalanced three phase system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 93-96.
- [10] QIN Wenping, WANG Peng, HAN Xiaoping, et al. Reactive power aspects in reliability assessment of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 85-92.
- [11] 易皓, 卓放, 翟灏, 等. 基于矢量谐振调节器的有源电力滤波器网侧电流检测控制方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 72-79.
YI Hao, ZHUO Fang, CUI Hao, et al. Research on source current detection type APF control scheme based on vector resonant regulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 72-79.
- [12] 周晨, 郑益慧, 王昕, 等. 基于双环控制器的电容分裂式三相四线制 DSTATCOM 控制方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 114-121.
ZHOU Chen, ZHENG Yihui, WANG Xin, et al. Modeling and modulation of the fault-tolerant grid-connected three-phase PWM converters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 114-121.
- [13] 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.
- [14] 董伟杰, 白晓民, 宋晓辉, 等. 基于 PI 神经网络的三相四开关电力有源滤波器研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4067-4074.
DONG Weijie, BAI Xiaomin, SONG Xiaohui, et al. Research on 3 phase 4 switch active power filters based on PINN[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4068-4074.
- [15] 王萌, 夏长亮, 宋战锋, 等. 不平衡电网电压条件下 PWM 整流器功率谐振补偿控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(21): 46-53.
WANG Meng, XIA Changliang, SONG Zhanfeng, et al. A power resonance compensation control strategy for PWM rectifiers under unbalanced grid voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(21): 46-53.
- [16] 朱翀, 曾志勇, 赵荣祥. 电流品质优化的容错型三相四开关逆变器载波调制算法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 40-47.
ZHU Chong, ZENG Zhiyong, ZHAO Rongxiang. Carrier-based modulation algorithm of fault-tolerant three-phase four switch inverter for better current performance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 40-47.
- [17] 郭小强, 郭伟扬, 漆汉宏, 等. 电网电压畸变不平衡情况下三相光伏并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 22-28, 19.
GUO Xiaoqiang, WU Weiyang, QI Hanhong, et al. Control strategies of three-phase PV grid-connected inverter under distorted and unbalanced voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 22-28, 19.
- [18] 张树全, 戴珂, 谢斌, 等. 多同步旋转坐标系下指定次谐波电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 55-62.
ZHANG Shuquan, DAI Ke, XIE Bin, et al. Selective harmonic current control based on multiple synchronous rotating coordinate[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 55-62.
- [19] RAMAN S, GOKARAJU R, JAIN A. An adaptive fuzzy MHO relay for phase backup protection with infeed from STATCOM[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 120-128.
- [20] 王江彬, 田铭兴, 陈敏, 等. 基于 Steinmetz 理论的三相四线制不平衡电流补偿[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(9): 20-26.
WANG Jiangbin, TIAN Mingxing, CHEN Min, et al. Three-phase four-wire unbalanced current compensation based on steinmetz theory[J]. Proceedings of the CSU-EPASA, 2016, 28(9): 20-26.
- [21] 锁军, 张志华, 杨杉, 等. 考虑分布式电源低电压穿越特性的配电网短路电流计算方法[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 22-27, 56.
SUO Jun, ZHANG Zhihua, YANG Shan, et al. A short-circuit current calculation method of distribution network with distributed generation considering low voltage ride through characteristic[J]. Smart Power, 2018, 46(4): 22-27, 56.
- [22] 黄梦华, 汪娟娟. 低压限流环节优化控制策略综述[J]. 广东电力, 2018, 31(10): 10-19.
HUANG Menghua, WANG Juanjuan. Review on optimization control strategy for voltage dependent current order limiter[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(10): 10-19.
- [23] 张国澎, 周犹松, 郑征, 等. 有源电力滤波器指定次谐波补偿优化限流策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 46-53.
ZHANG Guopeng, ZHOU Yousong, ZHENG Zheng, et al. Research on current-limiting optimization strategy for specific harmonic compensation of active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 46-53.

收稿日期: 2019-08-04

作者简介:

安小宇(1979—), 男, 副教授, 研究方向为电力电子系统可靠性与模型预测控制; E-mail: anxiaoyuzzuli@163.com

张涛(1995—), 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: lbzt159@163.com

李琰琰(1987—), 女, 讲师, 研究方向为电力电子系统可靠性与模型预测控制。E-mail: 582074055@qq.com

(编辑 魏小丽)