

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190997

组合开关状态的 NPC 三电平模型预测不平衡治理策略

李琰琰¹, 潘超¹, 曹宏², 金楠¹, 王军³

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

摘要: 三相四线制中点钳位(NPC)三电平不平衡补偿装置中点电压均衡会导致零序电流补偿不足, 影响不平衡治理效果。为解决这一问题, 提出组合开关状态的三电平模型预测不平衡治理策略, 分析不同类电压矢量开关状态零序电流补偿与中点电压均衡的关系。并根据各类开关状态补偿零序电流能力, 组合全零矢量、短矢量和中矢量13种开关状态进行模型预测不平衡治理。仿真对比不同组合开关状态在中点电压均衡前提下零序电流补偿能力, 并采用所提出的开关状态进行不平衡治理。结果验证了组合开关状态控制的有效性和准确性。

关键词: 模型预测控制; 三相四线制; 中点钳位三电平变换器; 三相不平衡

Combined switching state of model predictive control for unbalance regulation strategy for three-level NPC inverter

LI Yanyan¹, PAN Chao¹, CAO Hong², JIN Nan¹, WANG Jun³

(1. College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
2. Henan Senyuan Electric Co., Ltd., Zhengzhou 450002, China; 3. Sanmenxia Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Sanmenxia 472000, China)

Abstract: Neutral point voltage balance of a three-level compensator produces insufficient compensation of zero-sequence current in a three-phase four-wire grid. This will affect the effectiveness of unbalance control. To solve this problem, this paper proposes a combined switching state control strategy after researching the relationship between zero-sequence current and neutral point voltage with regard to different kinds of voltage vectors. According to the ability to compensate zero-sequence current of all switching states, a combined scheme of 13 switching states composed of zero vector, short vector and middle vector is selected to practice model predictive control. The zero-sequence current compensation ability of different combination switching states under the neutral point voltage balance is compared by simulation, and the switching state proposed in this paper is adopted to control the unbalance. The results verify the effectiveness and accuracy of the combined switching state theory and control algorithm.

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

Key words: model predictive control; three-phase four-wire; three-level neutral point clamped inverter; three-phase unbalance

0 引言

配网负荷具有复杂性和多样性的特点, 特别是非线性负载和不平衡负载接入配电网所产生的非正

序电流、谐波电流以及无功不足^[1-15]严重影响了电力网络和一、二次设备的安全运行。电能质量恶化的影响越来越受到国内外专家学者的关注, 其治理技术成为当今时代电力科学研究的一个热点。

三相不平衡是我国三相四线制配电网面临的主要问题。国家电网公司《国网运检部关于开展配电网台区三相负荷不平衡问题治理工作的通知》(运检三[2017]68号)文件中, 明确了三相不平衡的治理范围。不平衡度是衡量三相不平衡的标准, 而负序分量与

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51607159, 51707176); 河南省高等学校创新人才资助计划 (18HASTIT025); 河南省高等学校重点科研项目资助 (18A470020, 20A470011)

正序分量均方根比值就是不平衡度^[16-24]。配电网中存在负序分量和零序分量会导致以下严重问题:

- 1) 中线电流过大;
- 2) 功率因数低;
- 3) 由于线损的增加导致电能传输效率低;
- 4) 接入电网的电机和变压器过热;
- 5) 视在功率需求增加。

目前三相不平衡的治理方法方案主要分三类:一是配网结构升级改造;二是自动换相;三是电力电子装置消除负序和零序分量。配网升级改造工期长,仅能减弱因网架结构等技术原因导致的三相不平衡,无法根除后期由于管理不善、业扩报装、施工质量等多变因素引起的三相负荷不均匀问题。自动换相不能适用于大规模的治理,用户负荷是时变的,频繁换相引起操作过电压,电网无法安全稳定运行,应用范围仍较小。相比较而言,电力电子装置治理三相不平衡是目前为止较为切实可行的方案。

文献[1]提出了一种基于台区历史功率数据和用户用电量信息的台区三相不平衡负荷调整方法,建立了不平衡负荷调整的数学模型,但仅是数学模型建模,仍然需要调相进行不平衡治理。

电力电子装置通过特殊的电路结构可以消除电流不平衡分量,文献[2-4]提出使用四桥臂结构控制不平衡负载中点电流。文献[5]提出负载三角型连接和变换器星型连接能够消除零序分量。文献[6]提出使用 PI 控制的两电平结构变流器主动消除负序分

量。这些方法都只是消除某种特定结构下的不平衡分量且控制方法动态性能较差。

文献[7]提出一种改进 i_p-i_q 补偿电流检测方法,采用三电平中点钳位变流器结构消除三相不平衡。文献[8]研究新的补偿参考电流算法和不平衡治理策略,然而上述两篇均未解决三相四线制系统中中点电压均衡影响零序电流补偿的问题。

文献[9]提出容量限幅情况下的不平衡补偿策略,优先补偿零序电流,最大程度补偿负序电流,但是通用的配电网静止同步补偿器(DSTATCOM)结构老旧,仍存在零序补偿与直流侧电容电压均衡相互影响问题。文献[10]提出准 PR 控制的三电平逆变器及中点平衡策略,使用 1 个零矢量、6 个中矢量和 6 个大矢量来合成参考矢量控制中点电压平衡,但该研究仅适用于三相三线制系统无零序电流补偿的中点电压均衡控制。

在深入研究三相四线制系统零序电流补偿与中点电压均衡控制基础上,提出组合开关状态的三电平模型预测不平衡治理方案。该方案适用于三相四线制中低压配网,能够解决三电平结构零序电流补偿和中点电压均衡相互影响的问题。

1 NPC 三电平不平衡治理装置结构

基于 NPC 三电平变换器进行三相四线制三相不平衡治理研究,拓扑结构如图 1 所示。

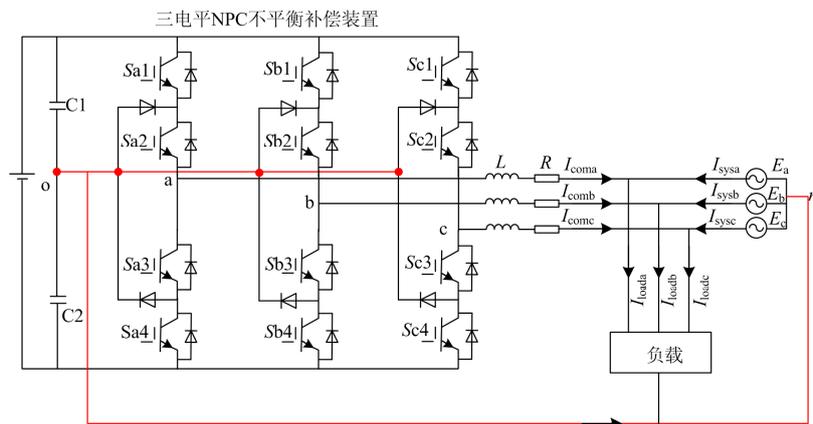


图 1 三电平 NPC 不平衡电网治理装置结构

Fig. 1 Structure of unbalance grid compensator based on three-level NPC

在三相四线制中低压配网中,三相不平衡主要体现在为电流不平衡。首先检测负载的三相电流,基于瞬时功率理论提取基波正序电流以外的电流作为补偿电流 I_{com} 注入电网,补偿后的电网电流如式(1)所示。

$$I_{sys} = I_{load} - I_{com} \quad (1)$$

式中, I_{com} 、 I_{sys} 、 I_{load} 分别为补偿电流、网侧电流、负载电流。

S_{KN} 表示 K 相第 N 个 IGBT 开关状态(1 代表开关闭合, 0 代表开关断开, $K=a, b, c, N=1, 2, 3$ 、

4), 三电平 NPC 开关状态与输出电压关系:

1) 当 $S_{K1}=1, S_{K2}=1, S_{K3}=0, S_{K4}=0$, 相对 O 点电压为 $U_{dc}/2$, 是正电平开关状态 SP, 用+表示。

2) 当 $S_{K1}=0, S_{K2}=1, S_{K3}=1, S_{K4}=0$, 相对 O 点电压为 0, 是零电平开关状态 SZ, 用 0 表示。

3) 当 $S_{K1}=0, S_{K2}=0, S_{K3}=1, S_{K4}=1$, 相对 O 点电压为 $-U_{dc}/2$, 是负电平开关状态 SN, 用-表示。

定义开关变量 S_k 代表某相所处电平状态:

$$S_k = \begin{cases} 1, & \text{(正电平开关状态)} \\ 0, & \text{(零电平开关状态)} \\ -1, & \text{(负电平开关状态)} \end{cases} \quad (2)$$

2 三相四线制模型预测不平衡治理策略

图2给出了三电平 NPC 不平衡电流治理模型预测控制框图, 通过电压互感器 PT 采集负载三相电压送入基波电压正序检测器, 输出基波正序电压。CT 采集的不平衡电流与基波正序电压作为输入量, 基于瞬时功率理论计算补偿电流 I_{ref} 。模型预测控制模块预测 $k+1$ 时刻不同开关状态下补偿电流 I_{com} 和上下电容中点电压差值, 并通过价值函数选择最优开关状态, 输出开关信号控制 12 个开关管正确动作。

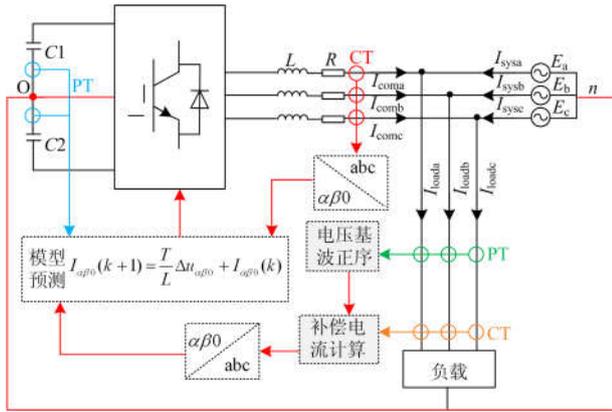


图2 三电平 NPC 不平衡电网模型预测控制框图

Fig. 2 Block diagram of three-level NPC unbalanced grid model predictive control

2.1 NPC 三电平零序补偿电流预测函数

NPC 三电平变换器输出电压与开关函数关系如式(3)所示。

$$\begin{aligned} U_{a0} &= S_a * \frac{U_{dc}}{2} \\ U_{b0} &= S_b * \frac{U_{dc}}{2} \\ U_{c0} &= S_c * \frac{U_{dc}}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

根据叠加定理, 假设三电平 NPC 输出零序电压

与电网零序电压作用于线路阻抗产生零序电流。恒功率条件下, NPC 输出零序电压与电网零序电压如式(4)所示。

$$U_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} U_{a0} + \frac{1}{\sqrt{2}} U_{b0} + \frac{1}{\sqrt{2}} U_{c0} \right) \quad (4)$$

$$E_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} E_a + \frac{1}{\sqrt{2}} E_b + \frac{1}{\sqrt{2}} E_c \right) \quad (5)$$

不平衡治理装置并网电感电压电流关系:

$$U_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (6)$$

由图2可知, 并网电感电压 U_L 存在以下关系:

$$U_L = U - E - U_R \quad (7)$$

通过前向欧拉逼近代替装置输出电流导数:

$$\frac{dI_L}{dt} \approx \frac{I_{L(k+1)} - I_{L(k)}}{T_s} \quad (8)$$

将式(7)、式(8)代入式(6), 得 $k+1$ 时刻的 NPC 输出电流如式(9)所示。

$$I(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L} \right) I(k) + \frac{T_s}{L} (U(k+1) - E(k+1)) \quad (9)$$

将式(4)、式(5)代入式(9)得 $k+1$ 时刻零序电流。

$$I_0(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L} \right) I_0(k) + \frac{T_s}{L} (U_0(k+1) - E_0(k+1)) \quad (10)$$

式中, U_0, E_0 为 NPC 输出和网侧零序电压。

2.2 中点电压不均衡分析与预测函数

三电平 NPC 的 27 个开关状态对应 27 个电压矢量(如图3所示), 根据电压矢量对应的幅值大小, 可将其分为长矢量、中矢量、短矢量与零矢量。

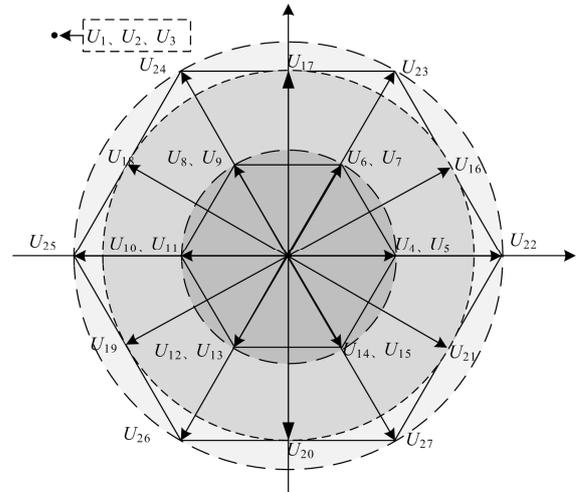


图3 NPC 三电平变换器输出电压空间矢量图

Fig. 3 Space vector diagram of output voltage of three-level NPC

1) 最外层圆环上的 6 个电压矢量幅值 $2U_{dc}$, 是长矢量, $U_{22}(1, -1, -1)$ 、 $U_{23}(1, 1, -1)$ 、 $U_{24}(-1, 1, -1)$ 、 $U_{25}(-1, 1, 1)$ 、 $U_{26}(-1, -1, 1)$ 、 $U_{27}(1, -1, 1)$ 。

2) 中间圆环上的 6 个矢量幅值是 $\sqrt{3}U_{dc}$, 是中矢量, $U_{16}(1, 0, -1)$ 、 $U_{17}(0, 1, -1)$ 、 $U_{18}(-1, 1, 0)$ 、 $U_{19}(-1, 0, 1)$ 、 $U_{20}(0, -1, 1)$ 、 $U_{21}(1, -1, 0)$ 。

3) 最内层圆环上的 12 个矢量幅值是 U_{dc} , 是短矢量 $U_4(0, -1, -1)$ 、 $U_5(1, 1, 0)$ 、 $U_6(-1, 0, -1)$ 、 $U_7(0, 1, 1)$ 、 $U_8(-1, -1, 0)$ 、 $U_9(1, 0, 1)$; $U_{10}(1, 0, 0)$ 、 $U_{11}(0, 0, -1)$ 、 $U_{12}(0, 1, 0)$ 、 $U_{13}(-1, 0, 0)$ 、 $U_{14}(0, 0, 1)$ 、 $U_{15}(0, -1, 0)$ 。

4) 圆心上的 3 个电压矢量幅值为 0, 是零矢量, $U_1(0, 0, 0)$ 、 $U_2(-1, -1, -1)$ 、 $U_3(1, 1, -1)$ 。

图 4 给出了装置并网接线示意图, 与三相三线制系统不同的是零线接在上下电容中点 O 上, 零线上流过的零序电流 I_n 与 NPC 内部中点电流 I_{0w} 共同作用, 影响电容 C_1 、 C_2 充放电, 加之电容保持电压稳定能力有限, 导致上下电容电压差过大, 输出电压电流波形畸变。三相四线制系统下, 零序电流与中点电压平衡存在耦合关系。

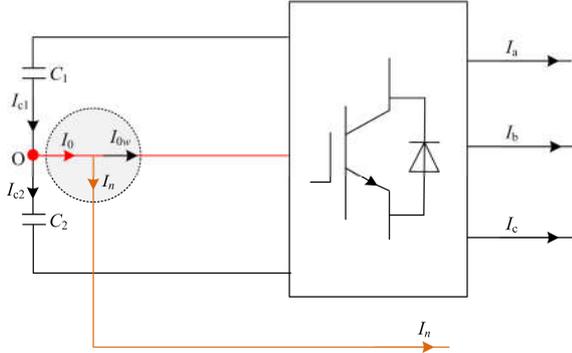


图 4 三电平 NPC 三相四线制并网结构

Fig. 4 Structure of three-level NPC connecting to three-phase four-wire grid

从图 4 可得影响中点电压平衡的电流 I_0 如式(11)所示。

$$I_0 = I_n + I_{0w} \quad (11)$$

定义零电平开关变量如式(12)所示。

$$S_{zk} = \begin{cases} 1, & K \text{ 相零电平开关闭合} \\ 0, & K \text{ 相零电平开关断开} \end{cases} \quad (12)$$

NPC 中点电流 I_{0w} 如式(13)所示。

$$I_{0w} = S_{Za} * I_a + S_{Zb} * I_b + S_{Zc} * I_c \quad (13)$$

零序电流 I_n 如式(14)所示。

$$I_n = -I_a - I_b - I_c \quad (14)$$

式(13)、式(14)代入式(11), 得

$$I_0 = (S_{Za} - 1) * I_a + (S_{Zb} - 1) * I_b + (S_{Zc} - 1) * I_c \quad (15)$$

NPC 直流侧电容电压电流关系如式(16)所示。

$$I_C = C \frac{dU_C}{dt} \quad (16)$$

通过前向欧拉逼近代替装置电容电压导数如式(17)所示。

$$\frac{dU_C}{dt} \approx \frac{U_{C(k+1)} - U_{C(k)}}{T_s} \quad (17)$$

$k+1$ 时刻的电容电压如式(18)所示。

$$U_C(k+1) = U_C(k) + \frac{T_s}{C} I_C(k) \quad (18)$$

直流侧上下两电容 $k+1$ 时刻电压差值如式(19)所示。

$$\Delta U(k+1) = \frac{T_s}{C} (I_{C1} - I_{C2}) + \Delta U(k) \quad (19)$$

由图 4 可知, $I_0 = I_{C1} - I_{C2}$ 则式(19)化简为

$$\Delta U(k+1) = \frac{T_s}{C} I_0 + \Delta U(k) \quad (20)$$

式(15)代入式(20), 得

$$\Delta U(k+1) = \frac{T_s}{C} ((S_{Za} - 1) * I_a + (S_{Zb} - 1) * I_b + (S_{Zc} - 1) * I_c) + \Delta U(k) \quad (21)$$

2.3 模型预测价值函数

α - β -0 坐标系电流预测值转换到 abc 坐标系, 考虑中点电压均衡的模型预测价值函数如式(22)所示。

$$g = |I_{refa} - I_{coma}| + |I_{refb} - I_{comb}| + |I_{refc} - I_{comc}| + \lambda |\Delta U| \quad (22)$$

式中: I_{coma} 、 I_{comb} 、 I_{comc} 为 abc 三相 $k+1$ 时刻预测电流; λ 为中点电压平衡权重系数。

不同开关状态对应不同的价值函数值, 最小的函数值对应的开关状态为最优开关状态, 控制 NPC 三电平变换器正确动作, 输出补偿电流, 治理三相不平衡。

3 开关状态分类分析与组合

三电平 NPC 27 个开关状态轮番控制, 会导致开关损耗增大, 为了解决这一问题, 使用某几类开关状态, 降低损耗, 同时做到中点电压平衡和三相不平衡治理。

与三相三线制比较, 三相四线制系统中, 零序电流从上下电容中点 O 流过, 中点电压平衡与零序电流补偿存在耦合关系, 表 1 为不同类开关状态三相零序电流分量对中点电压影响的关系, 基于三相

三线制三电平 NPC 结构中点电压平衡模型预测控制研究已经相对成熟, 以下分析不考虑正序, 负序分量对中性点电压影响, 模型预测 T_s 时刻内电感用电流源代替分析。

表 1 不同类开关状态下零序电流与中点电压关系

Table 1 Relation between zero sequence current and midpoint voltage in different switching states

电压 矢量	零电平 个数	S_{Za}	S_{Zb}	S_{Zc}	O 点流出 零序电流
长矢量	0	0	0	0	$I_{a0} + I_{b0} + I_{c0}$
中矢量	1	1	0	0	$I_{b0} + I_{c0}$
短矢量	1	1	0	0	$I_{b0} + I_{c0}$
短矢量	2	1	1	0	I_{c0}
全零矢量	3	1	1	1	0

长矢量开关状态下, NPC 内部零电平支路断开, S_{Za} 、 S_{Zb} 、 S_{Zc} 均为 0, abc 三相零序电流分量 (I_{a0} 、 I_{b0} 、 I_{c0}) 同时影响中点电压平衡, 以 (+, +, -) 开关状态为例, I_{a0} 、 I_{b0} 和 I_{c0} 分别影响上下电容充放电, 如图 5(a) 所示。

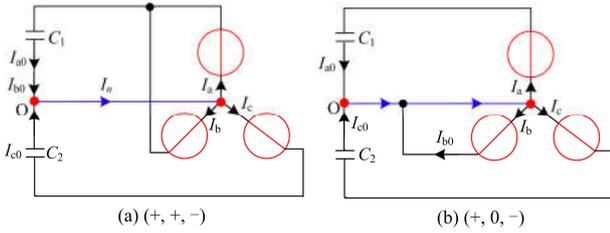


图 5 长、中矢量开关状态下零序电流对上下电容电压影响

Fig. 5 Effect of zero sequence current on capacitance voltage in long and medium vector switching state

中矢量开关状态下, 仅一相与 NPC 内部零电平支路接通, S_{Za} 、 S_{Zb} 、 S_{Zc} 中只有一个为 1, 两相零序电流分量同时影响中点电压平衡, 以 (+, 0, -) 开关状态为例, I_{a0} 和 I_{c0} 分别影响上下两电容充放电, b 相零电平支路与中线连接, I_{b0} 通过中线形成内部零序回路, 如图 5(b) 所示。

一个零电平短矢量开关状态下, 一相与 NPC 内部零电平支路接通, S_{Za} 、 S_{Zb} 、 S_{Zc} 中只有一个为 1, 两相零序电流分量同时影响中点电压平衡, 以 (+, 0, +) 开关状态为例, I_{a0} 和 I_{c0} 同时影响电容 C_1 充放电, b 相零电平支路与中线连接, I_{b0} 通过中线形成内部零序回路, 如图 6(a) 所示。

两个零电平短矢量开关状态下, 两相与 NPC 内部零电平支路接通, S_{Za} 、 S_{Zb} 、 S_{Zc} 中两个为 1, 仅有一相零序电流分量影响中点电压平衡, 以 (+, 0, 0) 开关状态为例, I_{a0} 影响电容 C_1 充放电, b、c 相零电平支路与中线连接, I_{b0} 、 I_{c0} 通过中线形成内部零

序回路, 如图 6(b) 所示。

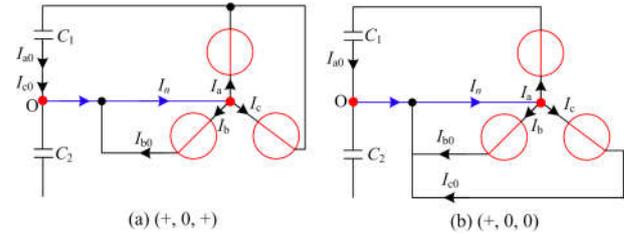


图 6 两个短矢量开关状态下零序电流对上下电容电压影响

Fig. 6 Effect of zero sequence current on capacitance voltage in two short vector switching states

(0, 0, 0) 矢量开关状态下, 三相与 NPC 内部零电平支路接通, S_{Za} 、 S_{Zb} 、 S_{Zc} 均为 1, 三相零序电流均通过中线形成内部回路, 不经过上下电容, 零序电流不影响中点电压平衡。

在保证零序电流补偿的前提下进行中点电压平衡, 三相不平衡补偿装置才能正常工作。模型预测控制过程中上下电容电压平衡与零序补偿存在耦合关系, 两者之间关系是控制的关键。

由式(3)、式(4)可得 NPC 输出零序电压为

$$U_0 = \frac{U_{dc}}{2\sqrt{3}}(S_a + S_b + S_c) \quad (23)$$

表 2 给出了不同类电压矢量开关状态对应的零序电压输出关系, 可得: 中矢量开关状态下, NPC 输出零序电压为 0, 无法满足零序电流补偿; 长矢量和两个零电平短矢量开关状态下, 输出零序电压较小; 一个零电平短矢量开关状态输出零序电压最大, 能够满足零序电流补偿的需求。

表 2 不同类开关状态对应零序电压输出关系

Table 2 Different switching states corresponding to zero sequence voltage output relations

电压矢量	零电平个数	S_a	S_b	S_c	U_0
长矢量	0	1	1	-1	$U_{dc}/2\sqrt{3}$
中矢量	1	1	0	-1	0
短矢量	1	1	1	0	$U_{dc}/\sqrt{3}$
短矢量	2	1	0	0	$U_{dc}/2\sqrt{3}$
全零矢量	3	0	0	0	0

模型预测的价值函数控制中点电压平衡的时候, 加大权重系数会使有零电平的中、短、全零电压矢量开关状态输出几率增大, 在直流侧电压不足情况下, 无法满足零序电流的补偿。

首先, 优先选择中矢量开关状态, 该状态输出电压幅值 $\sqrt{3}U_{dc}$ 略小于长矢量电压幅值 $2U_{dc}$, 且零序电流对中点电压平衡影响小于长矢量开关状态。

其次，为了进一步削弱零序电流对中点电压平衡影响，同时确保零序电流补偿，优先选择一个零电平的短矢量开关状态，此状态输出的零序电压最大。

最后，为了完全消除零序分量对中点电压平衡影响，选择全零(0, 0, 0)矢量状态。综上所述，最优的组合开关状态是中矢量、一个零电平短矢量、全零矢量开关状态组合成 13 种开关状态。

由于中矢量开关状态输出零序电压为 0，两个零电平短矢量开关状态输出零序电压较小(见表 2)，因

此不宜使用中矢量、两个零电平矢量组成的开关状态进行三相不平衡治理，易导致零序补偿不足问题发生。

4 不平衡治理仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 中搭建三相不平衡治理仿真模型，采用阻感性不平衡负载引起三相电流不平衡，在中点电压平衡的前提下进行三相四线制不同组合开关状态仿真(如图 7)，验证本文提出的最优组合开关状态，并从幅值和相位两个角度分析最优开关状态不平衡治理效果，系统仿真参数见表 3。

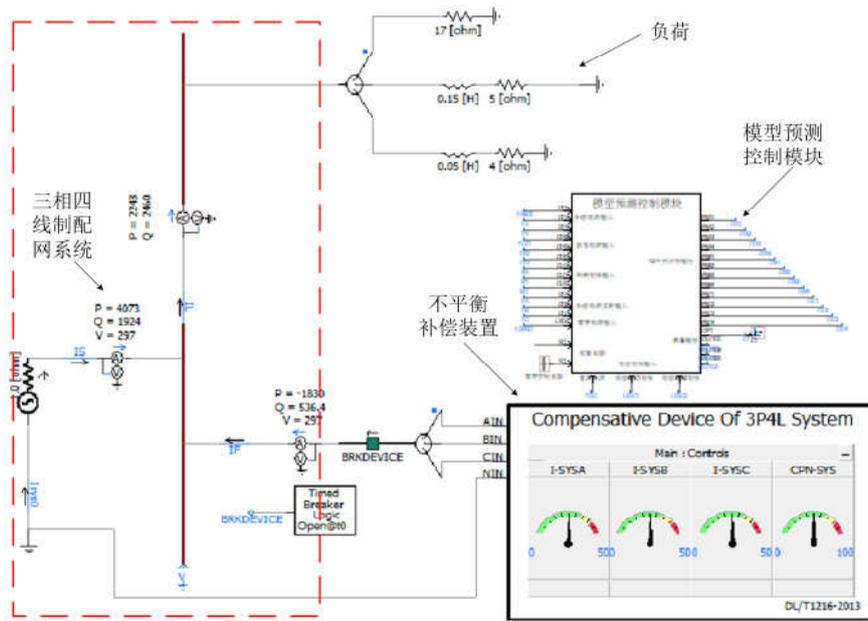


图 7 不平衡治理仿真模型

Fig. 7 Simulation model of unbalance compensation

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

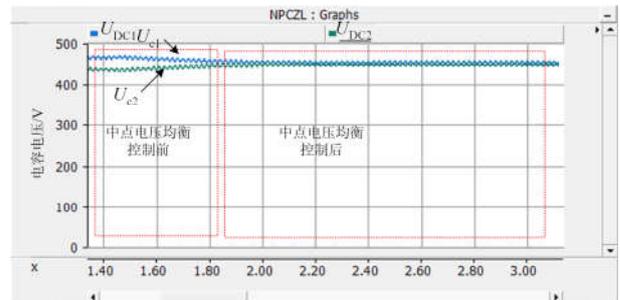
参数	数值
直流电压/V	900
网侧电压/V	220
采样频率/Hz	20 k
滤波电感/mH	40
滤波电阻/ Ω	0.2
A 相阻抗	17 Ω
B 相阻抗	5 Ω + 0.15 H
C 相阻抗	4 Ω + 0.05 H

4.1 不同组合开关状态下零序电流补偿对比

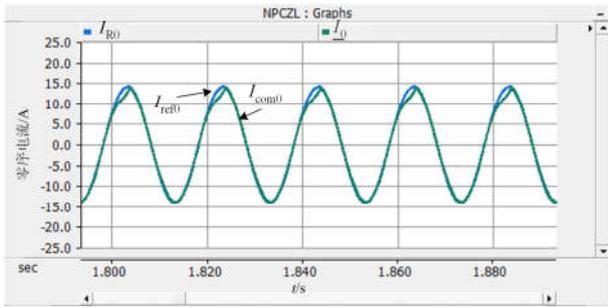
直流侧母线电压采用 900 V，可保证正序分量和负序分量完全补偿的条件下，验证所有组合开关状态中点电压均衡对零序电流补偿的影响。

1) 组合 1(全零矢量、两个零电平短零矢量、中矢量)开关状态仿真。

加入中点电压控制后，中点电压虽然均衡，如图 8(a)所示，但是由于中矢量和两个零电平短矢量零序输出电压较小，零序电流输出减少引起零序电流欠补偿， I_{com0} 与参考补偿电流 I_{ref0} 波形不一致，如图 8(b)所示。



(a) 中点电压平衡波形



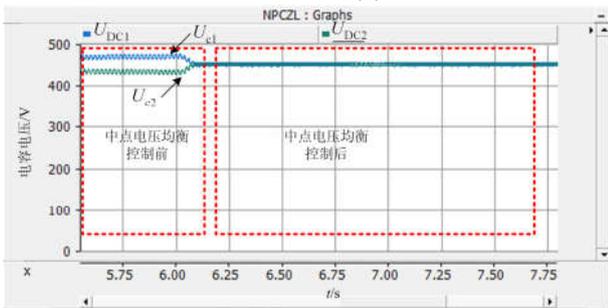
(b) 零序电流平衡波形

图 8 组合 1 状态零序电流与中点电压波形

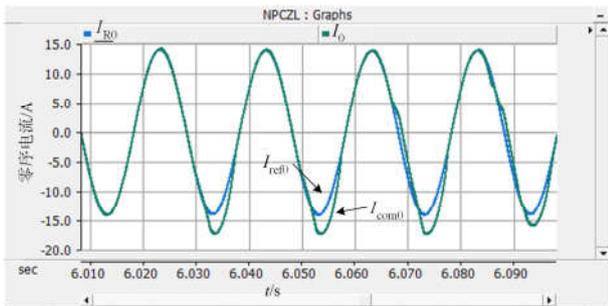
Fig. 8 State zero sequence current and midpoint voltage waveform of the combination 1

2) 组合 2(全零矢量、一个零电平短零矢量、长矢量)开关状态仿真。

加入中点电压控制后, 中点电压虽然均衡, 如图 9(a)所示。由于长矢量开关状态, 三相零序电流影响中点电压均衡, 且零序输出电压较小; 一个零电平开关状态零序输出电压最大, 对中点电压不平衡影响弱于长矢量, 所以保证中点电压均衡就会导致零序过补偿, 零序补偿输出电流 I_{com0} 与参考补偿电流 I_{ref0} 波形不一致, 如图 9(b)所示。



(a) 中点电压平衡波形



(b) 零序电流平衡波形

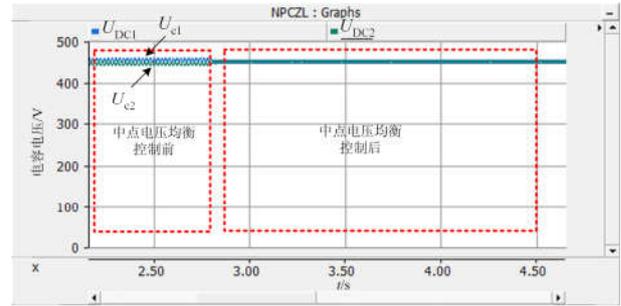
图 9 组合 2 状态零序电流与中点电压波形

Fig. 9 State zero sequence current and midpoint voltage waveform of the combination 2

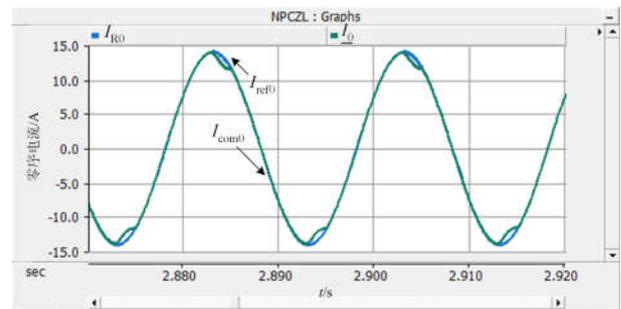
3) 组合 3(全零矢量、两个零电平短零矢量、长矢量)开关状态仿真。

加入中点电压控制后, 中点电压均衡, 如图 10(a)

所示, 但是由于长矢量开关状态, 零序电流全部影响中点电压均衡, 且两个零电平短矢量零序输出电压较小, 所以保证中点电压均衡就会引起零序电流欠补偿, 零序补偿输出电流 I_{com0} 与参考补偿电流 I_{ref0} 波形不一致, 如图 10(b)所示。



(a) 中点电压平衡波形



(b) 零序电流平衡波形

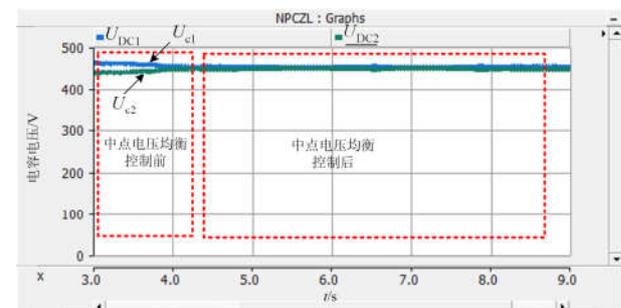
图 10 组合 3 状态零序电流与中点电压波形

Fig. 10 State zero sequence current and midpoint voltage waveform of the combination 3

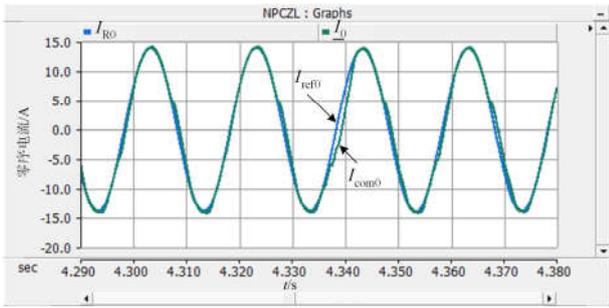
4) 组合 4(全零矢量、长矢量, 中矢量)开关状态仿真。

加入中点电压控制后, 中点电压均衡, 如图 11(a)所示。由于长矢量开关状态, 零序电流全部影响中点电压均衡, 且中矢量零序输出电压最小, 所以保证中点电压均衡就会引起零序电流欠补偿, 零序补偿输出电流 I_{com0} 与参考补偿电流 I_{ref0} 波形不一致, 如图 11(b)所示。

5) 组合 5(全零矢量、一个零电平短零矢量、两个零电平短零矢量)开关状态仿真。



(a) 中点电压平衡波形

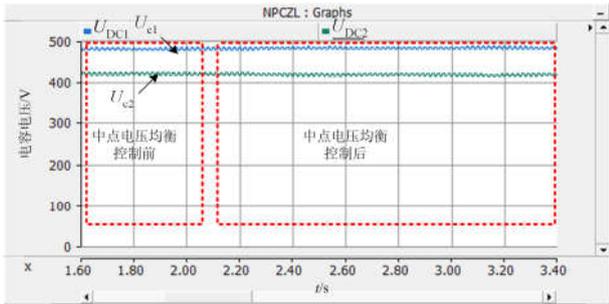


(b) 零序电流平衡波形

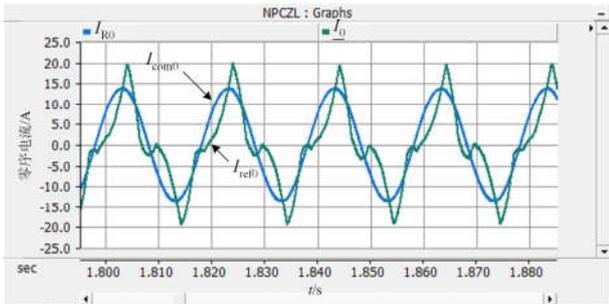
图 11 组合 4 状态零序电流与中点电压波形

Fig. 11 State zero sequence current and midpoint voltage waveform of the combination 4

加入中点电压控制后,中点电压仍然无法均衡,如图 12(a)所示。由于两个短矢量对应的电压矢量幅值较小,相同补偿容量的情况下,无法满足补偿需求,导致三相补偿电流严重不足,零序电流补偿电流过大,超过参考电流,进而引起中点电压无法均衡控制,零序补偿输出电流 I_{com0} 与参考补偿电流 I_{ref0} 波形不一致,如图 12(b)所示。



(a) 中点电压平衡波形



(b) 零序电流平衡波形

图 12 组合 5 状态零序电流与中点电压波形

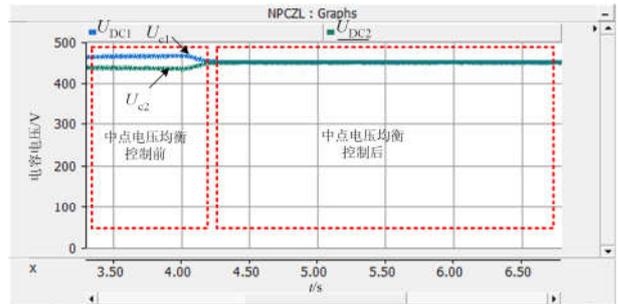
Fig. 12 State zero sequence current and midpoint voltage waveform of the combination 5

6) 组合 6(全零矢量、一个零电平短零矢量、中矢量)开关状态仿真。

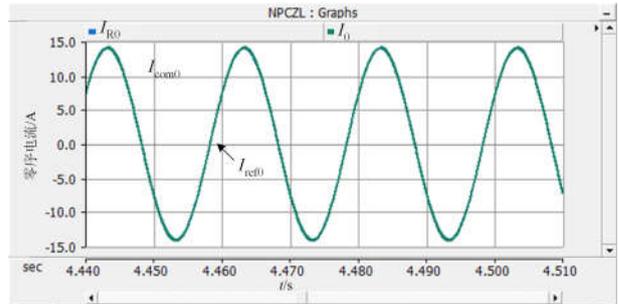
加入中点电压控制后,中点电压均衡,如图 13(a)所示,由于中矢量开关状态零序电流补偿能力最弱,但一个零电平开关状态零序补偿能力最大,

且两种开关状态的零序电流对中点电压均衡影响较小,所以中点电压均衡也能满足零序电流补偿需求,零序补偿输出电流 I_{com0} 与参考补偿电流 I_{ref0} 波形重合,如图 13(b)所示。

对比组合 1 至组合 5,组合 6 综合使用了零序补偿能力最强的一个零电平短矢量开关状态,且组合相同中点电压均衡能力的中矢量开关状态,具有兼顾中点电压均衡的同时考虑零序电流补偿能力,是三种组合中最优选择。三相四线制不平衡治理时,需要中点电压均衡,且三相实时输出补偿电流与参考补偿电压一致,组合 1 至组合 5 零序补偿无法满足上述需求,三相四线制系统不平衡治理效果差,故不再进行仿真验证。



(a) 中点电压平衡波形



(b) 零序电流平衡波形

图 13 组合 6 状态零序电流与中点电压波形

Fig. 13 State zero sequence current and midpoint voltage waveform of the combination 6

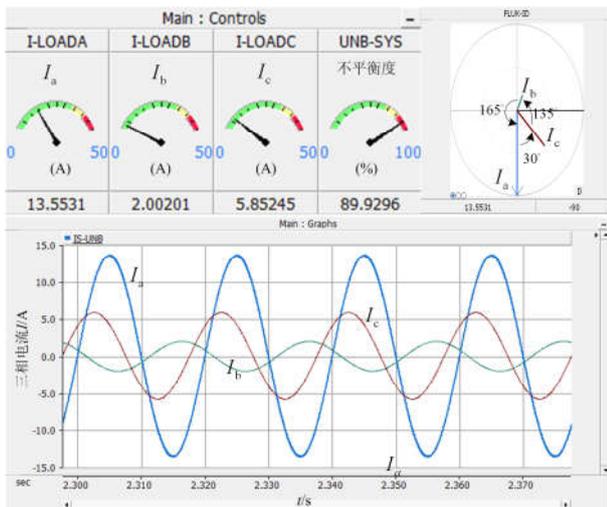
使用组合 6 治理不平衡时,模型预测价值函数的中点电压均衡系数 λ 为 1,可不考虑此系数影响,也是组合 6 的另一个优越性。接下来仿真从相位、幅值两方面验证组合 6 不平衡治理效果。

4.2 最优组合开关状态不平衡治理仿真

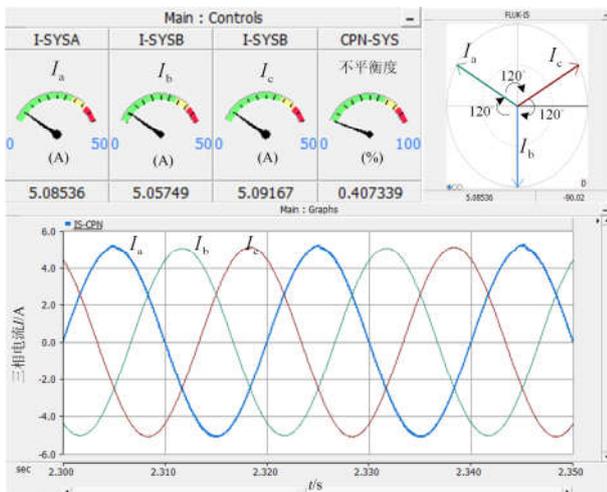
使用最优的组合开关状态进行不平衡治理,治理前,系统的三相电流 $I_a=13.55\text{ A}$, $I_b=2.00\text{ A}$, $I_c=5.85\text{ A}$,电流不平衡度 89.92%,如图 13(a)所示。治理后,系统的三相电流 $I_a=5.08\text{ A}$, $I_b=5.05\text{ A}$, $I_c=5.09\text{ A}$ 且相位差为 120° ,电流不平衡度 0.41%,如图 13(b)所示。

与全部 27 种开关状态相比, 组合开关状态同样具有不平衡治理能力, 而且使用了较少的电压矢量, 降低运算次数和复杂性, 减少开关状态损耗, 同时保证中点电压均衡与零序电流补偿, 适用于三相四制中低压配网不平衡治理。

仿真结果验证了本文提出的组合开关状态治理三相不平衡的有效性, 组合开关状态剔除了 27 种开关状态中不利于中点电压平衡与零序电流补偿的开关状态, 解决了补偿容量确定的情况下, 三电平 NPC 不平衡治理装置中点电压均衡与零序补偿的矛盾。



(a) 不平衡治理前三相电流波形与不平衡度



(b) 不平衡治理后三相电流波形与不平衡度

图 14 不平衡治理电流波形

Fig. 14 Unbalanced governing current waveform

5 结论

深入分析三相四线制三电平 NPC 补偿装置零序电流补偿和中点平衡耦合关系, 分类分组研究 27

个电压矢量零序电流补偿能力和零序电流对中点电压影响以及 NPC 输出电压矢量幅值, 基于均衡零序电流补偿与中点电压平衡的相互影响, 提出组合中矢量、一个零电平短矢量、全零矢量 13 种开关状态进行模型预测不平衡治理, 仿真结果验证了本文提出的理论和控制算法的准确性。根据补偿的容量大小可以继续优化选择开关状态, 需要进一步深入研究三相不平衡度与补偿容量大小与开关状态选择。

参考文献

- [1] 郭兆成, 车建涛, 郭启栋, 等. 基于低压配网功率和用电量信息的三相不平衡负荷调整[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 86-95.
GUO Zhaocheng, CHE Jiantao, GUO Qidong, et al. Three-phase unbalanced load adjustment based on power and power consumption information of low-voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 86-95.
- [2] MOHD A, ORTJOHANN E, HAMSIC N, et al. Control strategy and space vector modulation for three-leg four-wire voltage source inverters under unbalanced load conditions[J]. IET Power Electronics, 2010, 3(3): 323-333.
- [3] VECHIU L, CUREA O, CAMBLONG H. Transient operation of a four-leg inverter for autonomous applications with unbalanced load[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(2): 399-407.
- [4] VECHIU L, CAMBLONG H, TAPIA G, et al. Control of four leg inverter for hybrid power system applications with unbalanced load[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(7): 2119-2128.
- [5] MISHRA M K, GHOSH A, JOSHI A, et al. A novel method of load compensation under unbalanced and distorted voltages[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 288-294.
- [6] ZHANG Z, LIU Y, GUAN H. Unbalance loads compensation with STATCOM based on PR controller and notch filter[C] // 2018 10th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), July 2-4, 2018, Guiyang, China: 1-6.
- [7] LÜ W, WANG R, XU W, et al. A novel three phase unbalance detection and compensation method of active power filter[C] // 2018 Chinese Automation Congress (CAC), 2018, Xi'an, China: 418-422.
- [8] WANG P, CAO W, LIU K, et al. An unbalanced component detection method and compensation strategy based on second-order generalized integrator (SOGI)[C] // 2019 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), February 28-March 1, 2019, Champaign, IL, USA: 1-6.
- [9] 赵荔, 魏应冬, 姜齐荣, 等. 基于容量限幅的三相四线制 DSTATCOM 不平衡补偿策略[J]. 电工电能新技术,

- 2019, 38(6): 8-15.
ZHAO Li, WEI Yingdong, JIANG Qirong, et al. Unbalance compensation strategy of three-phase four-wire DSTATCOM based on capacity limitation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(6): 8-15.
- [10] 张国荣, 周同路, 李讯. 准 PR 控制的三电平逆变器及中点平衡策略[J]. 电测与仪表, 2016, 53(5): 1-6.
ZHANG Guorong, ZHOU Tonglu, LI Xun. Quasi-PR controlled three-level inverter and neutral-point balance strategy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(5): 1-6.
- [11] 王永辉, 何帅彪, 冯瑾涛, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 31-39.
WANG Yonghui, HE Shuaibiao, FENG Jintao, et al. Predictive voltage control of three-phase four-switch converter model with mid-point voltage balance considered[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 31-39.
- [12] 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.
- [13] 熊桥坡, 罗安, 马伏军, 等. 考虑负序补偿的角型链式 SVG 指令电流提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 12-19.
XIONG Qiaopo, LUO An, MA Fujun, et al. A reference current detection method of delta-connected cascaded SVG considering unbalance compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 12-19.
- [14] 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-EPSA, 2016, 28(9): 20-26.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 魏剑啸, 粟忠来, 杨波, 等. 配电台区无功功率及三相不平衡电容调节的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 71-79.
WEI Jianxiao, SU Zhonglai, YANG Bo, et al. Study on reactive power and three-phase unbalanced capacitance regulation in distribution console area[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 71-79.
- [18] ZHANG Z, LIU Y. A novel unbalance loads compensation method based on ultra-capacitor[C] // 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), November 4-7, 2018, Shenzhen, China: 1-5.
- [19] LEE J, CHOI H, JUNG J. Three level NPC dual active bridge capacitor voltage balancing switching modulation[C] // 2017 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), October 22-26, 2017, Broadbeach, QLD, Australia: 438-443.
- [20] LI Ning, LI Wanting, ZHANG Hui, et al. A novel modulation strategy of three level NPC converter[C] // 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), May 31-June 2, 2018, Wuhan, China: 1347-1351.
- [21] GAO X, TIAN W, LIU X, et al. Model predictive control of a three-level NPC rectifier with a sliding manifold term[C] // 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia), May 20-24, 2018, Niigata, Japan: 1661-1665.
- [22] VAZQUEZ S, AGUILERA R P, ACUNA P, et al. Model predictive control for single-phase NPC converters based on optimal switching sequences[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7533-7541.
- [23] SEBAALY F, VAHEDI H, KANAAN H Y, et al. Model predictive controller with fixed switching frequency for a 3L-NPC inverter[C] // IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 23-26, 2016, Florence, Italy: 6536-6511.
- [24] JIN Tao, WEI Haibin, MONNZONGO D L, et al. Model predictive control strategy for NPC grid-connected inverters in unbalanced grids[J]. Electronics Letters, 2016, 52(14): 1248-1250.

收稿日期: 2019-08-20; 修回日期: 2019-10-08

作者简介:

李琰琰(1987—), 女, 通信作者, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力电子模型预测与电能质量; E-mail: 582074055@qq.com

潘超(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子模型预测与电能质量. E-mail: 535232906@qq.com

(编辑 张爱琴)