

# 三电平DSTATCOM不平衡控制策略研究

王峰<sup>1</sup>, 张晓<sup>2</sup>

(1. 徐州工程学院 电气与控制工程学院, 江苏 徐州 221111;

2. 中国矿业大学 电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:**在电网电压不平衡状态下, 针对三相桥式三电平DSTATCOM在不平衡状态下生存能力差的问题, 提出了一种最大相电流最小化优化控制策略, 并在电网电压不平衡以及负载不对称的情况下对上述控制策略进行了仿真研究。仿真结果表明, 基于序分解的电流最大相优化控制不平衡控制策略取得了良好的补偿效果, 有效抑制了电网电压的不平衡。

**关键词:**配电网静止同步补偿器; 直接电压控制; 序分解; 最大相电流优化控制

**中图分类号:** TM921 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd19433

## Research on Unbalanced Control Strategies of Three-level DSTATCOM

WANG Feng<sup>1</sup>, ZHANG Xiao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221111,

Jiangsu, China; 2. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China)

**Abstract:** When the grid voltage imbalance, aiming at the poor viability of the three-phase bridge three-level DSTATCOM imbalance, a maximum phase current minimize optimal control strategy was proposed, in case of the grid voltage unbalanced and asymmetric loads, a simulation study were done on the above the control strategy. Simulation results show that the current maximum phase optimize control of unbalanced control strategy based on the sequence decomposition obtain a good compensation effect, and effective inhibition of the grid voltage imbalance.

**Key words:** distribution static synchronous compensator (DSTATCOM); direct voltage control; sequence decomposition; maximum phase current optimal control

在电力系统运行中, 单相接地、电网电压不平衡甚至畸变以及三相负载不对称的工况经常发生。在这些工况下, 电网电流不再对称, 而且不平衡程度越高, 电网电流负序分量幅值越大, 对电力系统以及电力系统中的设备和装置产生很大的危害。因此, 对配电网静止同步补偿器(简称DSTATCOM)不平衡情况下的控制策略进行研究从而实现不对称工况下负载电流的负序分量和无功分量的综合补偿具有重要的实际意义, 是静止同步补偿器研究中的一个热点方向<sup>[1-9]</sup>。

文献[7]提出一种在电网电压严重不平衡时用DSTATCOM补偿公共连接点处不平衡电压的控制方法, 扩展了DSTATCOM的补偿功能。文献[8]采用重复控制结合无源控制的方法对链式DSTATCOM进行电流控制, 实现负荷无功功率补偿, 有效抑制三相不平衡并有效控制直流电压。文献[9]根据FBD功率理论将电网电流直接作为控制目标, 在对电网电流误差进行序分解的基础上采用解耦控制, 实现了DSTATCOM的不平衡补偿。

本文针对电网电压不平衡提出了一种正、负

**基金项目:**徐州市应用基础研究计划项目(KC17077); 住房和城乡建设部科技项目(2015-K1-029);

徐州工程学院校科研青年项目(XKY2017224)

**作者简介:**王峰(1978—), 男, 博士, 副教授, Email: wangwf1231@163.com

序叠加的电网电压平衡化控制策略,仿真证明正、负序叠加的电网电压平衡化控制策略使电网电压不平衡度大大降低。针对补偿不对称负载时补偿电流出现不平衡现象,提出了一种补偿电流的优化控制策略,使得设备的利用率得到了很大的提高。最后通过仿真验证算法的正确性和有效性。

## 1 三电平 DSTATCOM 数学模型

三电平静止同步补偿器的每相桥臂有3种开关状态,利用开关函数对三电平 DSTATCOM 每相桥臂的开关状态进行等效,可以得到如图1所示的三电平静止同步补偿器的简化等效电路。

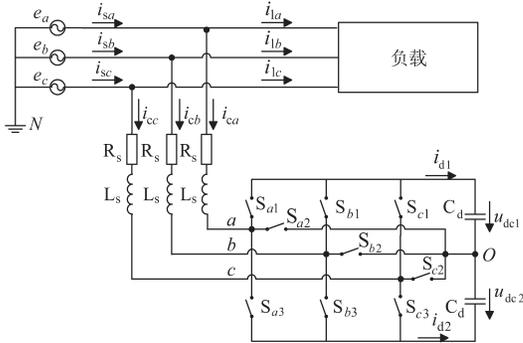


图1 三电平静止同步补偿器等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of three-level DSTATCOM

图1中,  $e_a, e_b, e_c$  为  $abc$  三相电网电压,  $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  为  $abc$  三相电网电流;  $R_s$  为等效电阻;  $L_s$  为连接电抗器电感;  $C_d$  为直流侧2个滤波电容;  $u_{dc1}$  和  $u_{dc2}$  分别为两滤波电容的电压;  $i_{la}, i_{lb}, i_{lc}$  为三相负载电流;  $i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$  为 DSTATCOM 产生的三相补偿电流。

由图1所示的三电平 DSTATCOM 等效电路,可得到  $abc$  三相静止坐标系下三电平静止同步补偿器平衡情况下的数学模型,如下式所示:

$$Z\dot{X} = AX + Be \quad (1)$$

其中

$$Z = \text{diag} [L_s \quad L_s \quad L_s \quad C_d \quad C_d]$$

$$X = [i_{ca} \quad i_{cb} \quad i_{cc} \quad u_{dc1} \quad u_{dc2}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & -S_{a1} + \frac{1}{3}(S_{a1} + S_{b1} + S_{c1}) & S_{a3} - \frac{1}{3}(S_{a3} + S_{b3} + S_{c3}) \\ 0 & -R_s & 0 & -S_{b1} + \frac{1}{3}(S_{a1} + S_{b1} + S_{c1}) & S_{b3} - \frac{1}{3}(S_{a3} + S_{b3} + S_{c3}) \\ 0 & 0 & -R_s & -S_{c1} + \frac{1}{3}(S_{a1} + S_{b1} + S_{c1}) & S_{c3} - \frac{1}{3}(S_{a3} + S_{b3} + S_{c3}) \\ S_{a1} & S_{b1} & S_{c1} & 0 & 0 \\ -S_{a3} & -S_{b3} & -S_{c3} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \text{diag}[1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$e = [e_a \quad e_b \quad e_c \quad 1 \quad 1]^T$$

## 2 电网电压平衡化控制策略

### 2.1 电网电压不平衡状态下 DSTATCOM 运行分析

电网电压的不平衡会给电力用户和配电网带来不利影响,按照国家的相关标准,三相电压不平衡度也是衡量电能质量优劣的一个重要指标。在电网电压不平衡时,基于对称假设的控制器性能会变差,在极端的情况下,在平衡条件下设计控制器时未被考虑的负序电压和负序电流甚至会烧毁 DSTATCOM 装置。当电网电压不平衡时 DSTATCOM 输出电流中含有负序分量,将电网电压和 DSTATCOM 的输出电流转换到  $\alpha-\beta$  坐标系下,得到 DSTATCOM 公共连接点视在功率如下式所示:

$$\begin{aligned} s &= p + jq \\ &= e_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta}^* \\ &= [E_p I_p e^{j(\alpha-\delta)} + E_N I_N e^{-j(\beta-\gamma)}] \cdot \\ &\quad [E_p I_N e^{-j(2\omega t + \beta - \delta)} + E_N I_p e^{j(2\omega t + \alpha + \gamma)}] \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\alpha, \beta, \delta, \gamma$  为相应的初始相位角;  $E_p, E_N$  分别为电网电压的正序分量和负序分量的幅值;  $I_p, I_N$  分别为 DSTATCOM 输出电流的正序分量和负序分量的幅值。

当电网电压不平衡时,电压和电流既包含正序分量又包含负序分量,从式(2)可以看出,公共连接点瞬时功率存在2倍频的脉动现象,由瞬时视在功率的计算公式原本相互独立的正、负电压电流分量在进行运算时耦合度到一起,出现直流部分(式(2)前半部分)和交流部分(式(2)后半部分),可以得出补偿装置与电网之间存在一个2倍频脉动的有功功率的交换,因此直流侧母线电压由于电容充电功率的波动也会以电压的2倍频波动。而母线电压的波动将直接影响 DSTATCOM 装置的交流侧输出电压。当电网电压不平衡时,直流电压出现波动,直流母线上的电压如下式所示:

$$U_{dc} = U_M [1 + k \sin(2\omega t)] \quad (3)$$

式中:  $U_M$  为直流分量的幅值;  $k$  为2倍频波动电压的幅值占总的母线电压幅值的百分比;  $\omega$  为工频频率,由于母线电压是成2倍频波动,故其叠加分量的频率为  $2\omega$ 。

设 DSTATCOM 的开关函数为  $S_a, S_b$  和  $S_c$ , 可得到静止同步补偿器的三相电压输出瞬时值表达式如下式所示:

$$\begin{cases} u_a = AU_{dc} \sin(\omega t) - \frac{AkU_{dc}}{2} \cos(3\omega t) + \frac{AkU_{dc}}{2} \cos(\omega t) \\ u_b = AU_{dc} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{AkU_{dc}}{2} \cos(3\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \frac{AkU_{dc}}{2} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ u_c = AU_{dc} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \frac{AkU_{dc}}{2} \cos(3\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \frac{AkU_{dc}}{2} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,在电网电压不平衡的条件下, DSTATCOM 的输出电压中不只含有基波正序分量,还含有基波负序分量和 3 次谐波分量,这是由于装置直流侧电压脉动经开关函数映射到 DSTATCOM 输出端造成的。这也导致 DSTATCOM 装置的输出电流中也含有了基波负序分量和 3 次谐波分量。

### 2.2 正、负序叠加的电网电压平衡化控制策略

电网电压不平衡在给电网和电力用户带来不利影响的同时,还会使 DSTATCOM 装置母线电压产生波动,且交流侧出现短路的负序电流,严重威胁设备运行安全。文献[9]提出一种基于 FBD 功率理论的不平衡控制策略,该控制算法主要针对电流的平衡化控制,对于电网电压的不平衡只是起到缓解作用。文献[10]提出一种负序电压前馈和优化开关函数调制法相结合的不对称控制策略,该控制策略很好地抑制了静止同步补偿器交流输出侧电压的负序和 3 次谐波分量,同时前馈的负序电压等于电网电压中的负序分量,很好地抑制了负序电流分量,降低装置过电流的可能性,但是这种控制策略并未从根本上改善电网电压的不平衡状况。本文针对问题的根源,给出一种正、负序叠加的电网电压平衡化控制策略。

在三相三线制系统中没有零序分量的通路,同时本文研究的三电平 DSTATCOM 采用空间矢量脉宽调制技术,因此系统中的零序分量以及高次谐波分量可以忽略不计。在三电平 DSTATCOM 系统中,当电网电压不平衡时,利用对称分量法可以将电压电流分解为相互独立的正序分

量和负序分量 2 部分,而正、负序分量之间不存在相互耦合,因此控制过程中可对它们分别进行控制。三电平 DSTATCOM 负序分量部分的解耦过程如下所示:

$$\begin{cases} u_{d1}^- = (K_{ip} + \frac{K_{il}}{s})(i_{cd}^* - i_{cd}^-) \\ u_{q1}^- = (K_{ip} + \frac{K_{il}}{s})(i_{cq}^* - i_{cq}^-) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} u_{cd}^- \\ u_{cq}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_d^- \\ e_q^- \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega' L_s \\ -\omega' L_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd}^- \\ i_{cq}^- \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{d1}^- \\ u_{q1}^- \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd}^- \\ i_{cq}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 \\ 0 & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd}^- \\ i_{cq}^- \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{d1}^- \\ u_{q1}^- \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $i_{cd}, i_{cq}$  为  $d, q$  轴电流分量;  $u_{cd}, u_{cq}$  为交流侧输出电压的参考值;  $e_d, e_q$  为误差分量;  $R_s$  为等效电阻;  $L_s$  为连接电抗器电感; 正序数学模型其中上标“+”表示各变量的正序分量,负序数学模型其中上标“-”表示各变量的负序分量。

当同步旋转角频率  $\omega' = -\omega$  时,即与正序分量  $dq$  变换的角频率方向相反。三电平 DSTATCOM 正、序叠加的电网电压平衡化控制方法原理框图如图 2 所示。

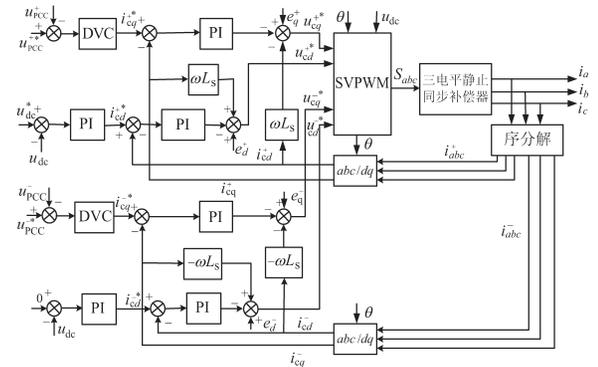


图 2 三电平 DSTATCOM 正、序叠加的电网电压平衡化方法原理框图

Fig.2 Principle block diagram of grid voltage balancing method for three-level DSTATCOM with positive and sequential stacking

在电网电压不平衡的情况下,首先检测电网电压以及补偿电流并对其进行序分解,把得到的补偿电流的正序分量和负序分量分别基于同步旋转角频率  $\omega$  和  $-\omega$  进行同步旋转变换,得到各控制量和反馈量的直流参考值。然后利用正序和负序电流状态反馈解耦控制方法,分别实现正、负序有功电流和无功电流的解耦控制。由于解耦控制后 DSTATCOM 补偿装置可以等效为一个线性系统,从而根据叠加定理可以得到三电平

DSTATCOM 交流侧输出电压的参考电压矢量,经过简化三电平空间矢量算法产生 PWM 驱动信号,控制三电平 DSTATCOM 产生实际系统运行中所需要的补偿电流。

### 3 负荷不平衡补偿的电流补偿优化控制策略

在进行不平衡负荷补偿时,静止同步补偿器的补偿能力受制于电流最大相的电流大小。即使控制和保护得当装置本身不会过流损坏,但是装置自身的保护控制会限制补偿电流的输出,影响了不平衡补偿的效果。另一方面,如果按照最大可能补偿电流设计,在电流最大相正常工作时,则大大降低了补偿装置的综合利用率。文献[11]提出一种最大相电流最小化控制策略,很好地解决了上述矛盾,但是要求主电路必须是三角形连接同时还必须具备分相控制的能力。这就限制了这种最大相电流最小化控制策略的应用,本文在此基础上给出了一种改进的最大相电流最小化控制策略,使其在三相全桥电路中也可得到很好的应用。

通常情况下,根据国家电能质量标准或者一些特定的补偿原则所制定的一些补偿标准,在这些补偿目标下,所需要的补偿线电流也是唯一确定。但是,如果 DSTATCOM 采用三角形的连接方式接入电网,对于唯一确定的线电流可以通过多种不同的相电流组合获得。对于一组给定的相电流,则对应的线电流也唯一确定。根据三相电路的基本理论,如果采用星形连接方式,其相电流等于线电流。也就是说,在三相三线制系统中,任意一组相电流有且只有唯一一组确定的线电流与之对应。在三相三线制系统中采用三角形连接时,对一组唯一确定的线电流,却可以由无穷多组相电流组合得到。从上面的分析可以得出,为了得到一组既定的补偿线电流,可以通过多种相电流组合实现,我们称之为三角形相电流的多样性。这就使得静止同步补偿器的不对称补偿电流优化控制成为可能。因此,进行不平衡负荷的电流补偿时,采用三角形连接比较适合。

为了确定给出三角形连接的负荷或补偿装置电流的相量关系,可以把整个三角形连接的系统看作一个节点,由基尔霍夫电流定律可知 3 个线电流相量构成一个闭合三角形,如图 3a 所示。 $\triangle ABC$  的 3 个顶点  $A, B, C$  之间的距离和方向分

别表示了线电流  $I_a, I_b, I_c$  的幅值和相位;点  $D$  和顶点  $A, B, C$  之间的距离和方向分别表示了相电流  $I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$  的幅值和相位。根据以上所表述的规则,在一组唯一给定的线电流前提下,对于不同的相电流组合, $D$  点在复平面内出现的位置不同,所表示的坐标也就不同。可以得出, $D$  点坐标与相电流组合一一对应<sup>[11]</sup>。假设  $D$  点位置移动到  $F$  点,如图 3b 所示。 $F$  点对应另外一组相电流,新的一组相电流的大小仍然由  $F$  点到三角形 3 个顶点  $A, B, C$  的距离来表示。由图 3b 不难发现,两组相电流的大小完全不同。因此,在线电流已经确定的情况下采用三角形连接方式系统,要想获得一组新的相电流只需改变  $D$  点的位置,通过这种方法完全有可能获得三相大小比较均衡的相电流。在文献[10-11]中,详细给出了根据线电流确定  $D$  点为电流三角形外接圆圆心对应的相电流的方法,本文不再赘述。因此,在进行不对称负载电流优化控制时的关键点就是在复平面内寻找一个  $D$  点,使得  $D$  点到补偿线电流所确定的三角形的 3 个顶点的最大距离最小化。根据平面几何中的相关定理:对于任意  $\triangle ABC$ ,有且只有一个  $D$  点存在且满足上述条件,一般为三角形的外接圆圆心。

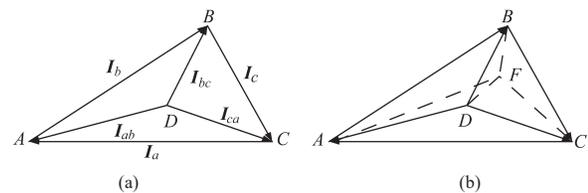


图3 电流相量关系

Fig.3 Current phasors relationships

静止同步补偿器不平衡补偿电流优化控制的前提条件是补偿装置要采用三角形连接方式。而基于二极管钳位的三电平静止同步补偿器其主电路是星形连接方式,且三相桥臂之间相互耦合,独立的分相控制较难实现。因此,本文提出在接入电抗器加装 Y- $\triangle$  型隔离变压器,来解决三相全桥式补偿器的电流优化控制问题。三电平 DSTATCOM 主电路接入电网公共连接点 (PCC) 方式如图 4 所示。

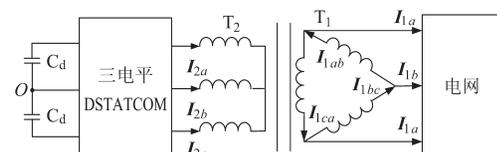


图4 三电平 DSTATCOM 经隔离变压器接入电网

Fig.4 Three-level DSTATCOM by the isolation transformer connected to grid

如图4所示,低压侧采用星形连接方式,高压侧采用三角形连接方式。假设变压器变比为  $N$ , 可以得出 DSTATCOM 补偿装置输出电流与输入电网线电流之间的关系如下式所示:

$$\begin{cases} I_{1a} = \frac{1}{N}(I_{2a} - I_{2c}) \\ I_{1b} = \frac{1}{N}(I_{2b} - I_{2a}) \\ I_{1c} = \frac{1}{N}(I_{2c} - I_{2b}) \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)得出,对于电网侧一组唯一确定的不平衡补偿电流,可以通过 DSTATCOM 补偿装置输出多组不同的相电流组合得到。因此使得不平衡补偿电流优化控制在三相全桥式补偿装置中的实现成为可能。

#### 4 不平衡状态下 DSTATCOM 控制策略仿真研究

为验证本文研究的不平衡状态下的各种控制策略,搭建了外环采用直接电压控制器计算所需要补偿的无功指令,内环采用状态电流反馈的三电平 DSTATCOM 补偿装置的 Matlab 仿真模型。仿真模型参数设定为煤矿专用的 6 kV 配电电压等级,在输电线路首端对电压进行了人为的抬升 ( $1.1 \times 6 \text{ kV}$ ),采用集中参数的  $\pi$  型等效电路来模拟 10 km 的输电线路,在公共连接点处电压等级恰好为 6 kV,三电平 DSTATCOM 在公共连接点处通过  $\Delta$ -Y 隔离变压器接入电网。隔离变压器一次侧的额定电压 6 kV 采用三角形连接方式,二次侧的额定电压 660 V 采用星形连接方式。连接电抗器电感值为 2 mH,直流侧电容选取为 4 700  $\mu\text{F}$ ,装置与电网之间的短路比为 1.8。仿真波形如图5、图6所示。

图5给出了电网公共连接点电压出现 10% 的不平衡度时 DSTATCOM 的治理情况,图 5a 在 0.1 s 时 DSTATCOM 投入电网检测到电网电压不平衡,在负序分量上发出一个感性无功,在 0.14 s 之后公共连接点电压不平衡得到有效改善(采用 6 kV 线电压标么处理),很好地验证了本文所提出的正、负序叠加的不平衡控制方法的可行性和有效性。图 5b、图 5c 分别为直流母线电压和中点电位波动情况,可以看出,在整个补偿过程中母线电压始终保持给定值 1 500 V,中点电位波动在  $\pm 50 \text{ V}$  之内,满足补偿需求。图 5d、图 5e 分别给出 DSTATCOM 进行补偿时无功功率给定和反馈。

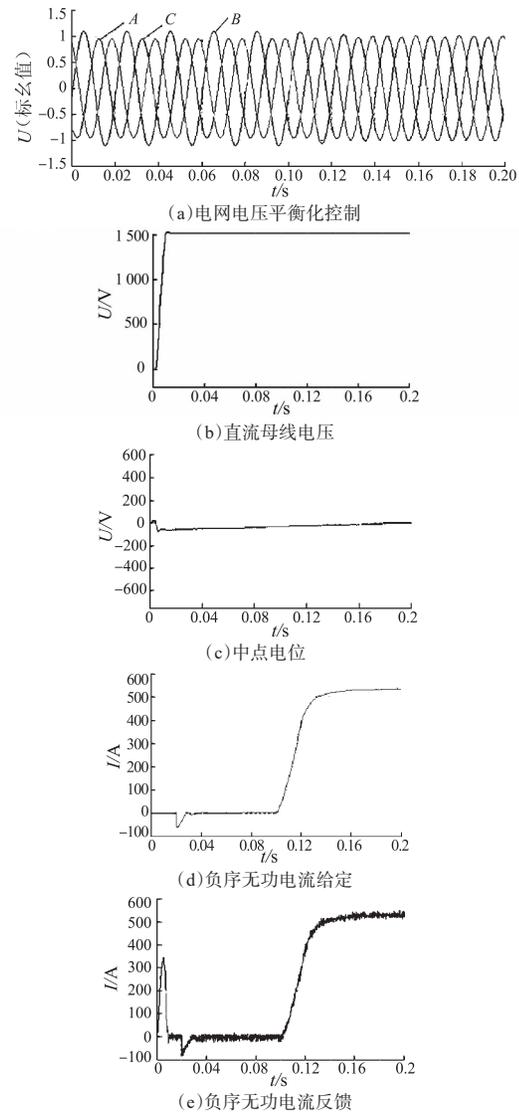


图5 电网电压平衡化仿真

Fig.5 Grid voltage balance of the simulation

图6给出最大相电流最小化优化控制的仿真波形。可以看出,经过电流优化控制,幅值不平衡的补偿电流通过隔离变压器被转化为相位不

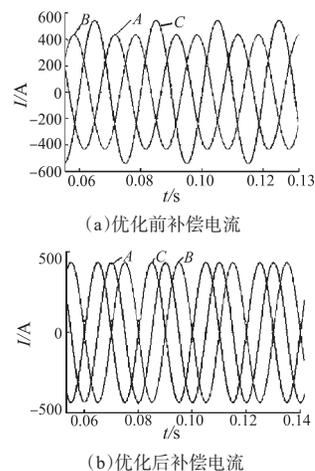


图6 最大相最小电流优化控制

Fig.6 Maximum relative to minimum current optimal control

平衡,每一相补偿电流幅值相等,最大限度地利用了DSTATCOM补偿装置的设计容量。

## 5 结论

本文首先指出利用三电平DSTATCOM治理不平衡的必要性;其次对电网电压不平衡状态下DSTATCOM的运行特性进行了详细分析,说明电压负序分量会造成装置过流影响DSTATCOM正常运行;针对电网电压不平衡提出了一种正、负序叠加的电网电压平衡化控制策略,仿真证明正、负序叠加的电网电压平衡化控制策略使电网电压不平衡度大大降低;针对补偿不对称负载时补偿电流出现不平衡现象,提出了一种补偿电流的优化控制策略,使得设备的利用率得到了很大的提高;最后通过仿真验证了算法的正确性和有效性。

### 参考文献

- [1] 宋亮. STATCOM并网侧LCL谐波抑制器新设计方法[J]. 电气传动,2015,45(11):20-25,30.
- [2] 王俊峰,杨艳蓉. DSTATCOM并网侧LCL滤波器设计研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38(2):52-57.
- [3] 王峰,张旭隆,曹言敬. 三电平DSTATCOM在煤矿中的应用[J]. 煤炭工程,2016,48(12):63-65,69.
- [4] 刘守明,韩爱芝,张之昊,等. 配电网静止无功补偿器设计及其并联运行策略[J]. 电力电子技术,2015,49(5):105-108.
- [5] 刘振武,孙晋璐. 低压STATCOM死区效应补偿方法的研究[J]. 电气传动,2015,45(2):30-34.
- [6] 王峰,张旭隆,何凤有,等. 三电平静止同步补偿器内模控制研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(9):96-102.
- [7] 李旷,刘进军,魏标,等. 静止无功发生器补偿电网电压不平衡的控制及其优化方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(5):58-63.
- [8] 周宏伟,黄晓明. 不平衡负载下DSTATCOM非线性控制研究[J]. 电力电子技术,2017,51(8):116-120.
- [9] 伏祥运,王建曠,范伟锋,等. 不平衡系统中D-STATCOM的控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(4):93-99.
- [10] 朱永强. D-STATCOM不平衡负荷补偿电流的3种设计方案[J]. 电力系统自动化,2007,31(1):75-79.
- [11] 朱永强,刘文华,宋强,等. D-STATCOM不平衡负荷补偿电流的优化设计[J]. 电力系统自动化,2005,29(8):65-70.

收稿日期:2018-08-02

修改稿日期:2018-11-15