

# 基于容量限幅的三相四线制 DSTATCOM 不平衡补偿策略

赵 荔<sup>1</sup>, 魏应冬<sup>1</sup>, 姜齐荣<sup>1</sup>, 马慧远<sup>2</sup>, 于希娟<sup>2</sup>, 袁志昌<sup>1</sup>

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京 100084;

2. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

**摘要:**为灵活补偿低压配电系统中存在的大量不平衡电流并防止装置过流,提出了一种基于容量限幅的三相四线制 DSTATCOM 不平衡补偿策略。当 DSTATCOM 容量不足以补偿全部不平衡电流时,将优先补偿零序电流,使配电变压器中性线电流满足行业标准,并在最大程度上补偿负序电流。与比例限流保护相比,该策略限流效果无时延,且能灵活地设定负序电流和零序电流补偿量。基于 MATLAB 的数值仿真和基于 PSCAD/EMTDC 的电磁暂态仿真均验证了该算法的有效性。

**关键词:**不平衡补偿;三相四线制;有限容量;零序优先

**DOI:** 10.12067/ATEEE1903033

**文章编号:** 1003-3076(2019)06-0008-08

**中图分类号:** TM761

## 1 引言

低压配电系统中普遍采用三相四线供电方式,商厦和楼宇中普遍存在的单相负荷如计算机、复印机、照明设备、变频空调等将在低压配电系统中产生大量的不平衡电流,引起三相电压不平衡。不平衡电流可分解为负序分量和零序分量。其中,负序分量会降低配电变压器出力,造成配电变压器单相过载;零序分量可能导致中线过流故障,使整个系统的单相负荷无法正常工作。因此,Q/GDW 1519-2014《配电网运维规程》及 DL/T 1102-2009《配电变压器运行规程》规定,Y/yn0 接线的配电变压器运行时的三相电流不平衡度应小于 15%,变压器中线电流不能超过变压器额定电流的 25%;Dyn11 接线的配电变压器运行时的三相电流不平衡度应小于 25%,变压器中线电流不能超过变压器额定电流的 40%。

由于配电系统用户负荷呈随机性波动,目前仅通过电力部门的规划和管理,对不平衡的抑制效果十分有限。利用配电网静止同步补偿器(Distribution-Level Static Reactive Compensator, DSTATCOM)或有源滤波器(Active Power Filter, APF),既可对配电系统进行动态无功补偿和谐波治理,又能有效解决负荷不平衡问题。不过在实际应用中,DSTAT-

COM 等有源设备单位容量的成本较高,完全补偿所有电能质量目标通常造价过高;若基于经济性考虑配置有限的设备容量,当补偿目标潮流超出变流器额定容量时,一旦控制不当触发保护脉冲封锁并退出补偿,其补偿效果将大打折扣。因此,需考虑 DSTATCOM 在额定容量有限的条件下的补偿策略,使得 DSTATCOM 既不会因为补偿过流而退出,又能最大限度利用 DSTATCOM 设备容量。

围绕如何避免补偿设备过流和提高治理设备利用率,国内外已开展了不少研究<sup>[1-12]</sup>。文献[1,2]提供了 2 种有限装置容量下的限流保护措施:截断限流保护和比例限流保护,但由于各补偿目标之间未能解耦,无法灵活选择补偿目标和对应权重。文献[3,4]提出了选择性补偿策略,其中,文献[3]根据 IEEE Std. 1459 标准来计算无功、不平衡和谐波各补偿分量,文献[4]则利用等效电导法进行选择计算,但文献[3]和文献[4]都没有结合装置的额定容量进行选择补偿,无法充分利用设备容量。文献[5]直接将各补偿分量的代数和与补偿设备额定电流比较,并给出各分量补偿优先级和权重;但由于忽略了正序无功与负序相量夹角的实时变化,计算所得各补偿分量并不能真实反映是否达到额定电流,仍难以有效利用设备容量。考虑到实时估算各补偿

**收稿日期:** 2019-03-11

**基金项目:** 国家重点研发计划重点专项(2017YFB1200801)、国家电网公司总部科技项目(5202011600UH)

**作者简介:** 赵 荔(1994-),男,湖北籍,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制;

魏应冬(1979-),男,河南籍,讲师,博士,研究方向为交直流混联配电网分析、电能质量分析与控制(通讯作者)。

分量与设备额定容量关系的必要性,文献[6-8]分别利用不同算法进行计算,如文献[6]采用基于神经网络的最小二乘法在线计算各分量权重,文献[7]基于改进的粒子群方法对各次谐波分量权重进行了优化,文献[8]则将容量约束条件与补偿目标均转换为矩阵不等式求解补偿相量的实部、虚部和谐波分量。上述方法可实时根据负荷变化调节各补偿分量权重,充分利用设备容量,但局限在于算法均较为复杂,计算量大,实时控制实现难度较大。文献[9]针对晶闸管控制的 LC 支路与有源电力滤波器构成的混合补偿系统,通过负荷功率解耦,实现了有限容量下的无功、不平衡和谐波分量的优化补偿。文献[10,11]针对两端口 DSTATCOM,基于无功和负序对称解耦,提出在有限容量约束下无功补偿优先的负序最优补偿策略;文献[12]则针对三相三线制 DSTATCOM 提出考虑容量限幅的负序优先的补偿方法。文献[10-12]的选择性补偿方法可充分利用补偿设备容量,具有计算量少、实时性高的优点,但并不适合在三相四线制 DSTATCOM 中应用。特别是,在以上所有针对三线四线制配网不平衡补偿的研究中,负序和零序分量均相互耦合,无法单独对负序分量和零序分量进行选择优化补偿。

因此,本文针对三相四线制配电系统中的负序和零序分量超标问题,提出一种考虑容量限幅的三线四桥臂 DSTATCOM 的不平衡补偿策略。该策略通过对零、负序进行解耦,在装置容量不足以补偿全部不平衡容量时,可对负序和零序分量进行选择优化补偿,灵活设定零序分量和负序分量的补偿量,充分利用 DSTATCOM 装置容量,使配电变压器电流不平衡度和中线电流尽可能满足行业标准。

## 2 DSTATCOM 比例限流保护

### 2.1 DSTATCOM 系统结构

通用三相四线制 DSTATCOM 不平衡补偿原理如图 1 所示。图 1 中,  $U_{dc}$  为 DSTATCOM 直流母线电压,  $L$  和  $L_n$  为滤波电抗,  $C$  为滤波电容。  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  为配电网侧相电压,  $i_{Ln}$ 、 $i_{Lk}$ 、 $i_{ck}$  ( $k=a,b,c$ ) 分别为负荷中线电流、负荷线电流和 DSTATCOM 输出补偿电流。通用控制策略为直流电压控制模块生成的有功电流  $i_{pk}^*$  与不平衡电流检测模块生成的不平衡电流  $i_{uk}^*$  叠加作为参考电流值  $i_k^*$ 。电流跟随环节使 DSTATCOM 输出补偿电流跟随参考电流值,产生的调制波  $m_k$  经过脉冲调制后得到桥臂开关管控制信号。

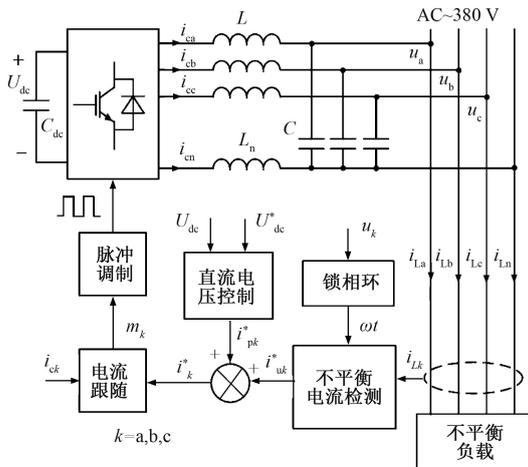


图 1 三相四线制 DSTATCOM 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of three-phase four-wire DSTATCOM

### 2.2 比例限流保护

图 1 中 DSTATCOM 控制策略未作限流保护,为避免 DSTATCOM 过流,可采用比例限流方式。具体为:取三相参考电流有效值  $i_{aRMS}^*$ 、 $i_{bRMS}^*$ 、 $i_{cRMS}^*$  与 DSTATCOM 额定电流  $I_m$  比较,得到一个比例系数:

$$\lambda = \min\left(\frac{I_m}{i_{aRMS}^*}, \frac{I_m}{i_{bRMS}^*}, \frac{I_m}{i_{cRMS}^*}, 1\right) \quad (1)$$

原参考电流乘以该比例系数即可得到经过比例限流后的新参考电流。该比例限流方式采用有效值定义计算,限流的效果会有一定的滞后。并且,比例限流策略未对负序和零序分量进行解耦,不能灵活地设定零序分量和负序分量的补偿量。为此,下文提出一种基于零序、负序分量解耦的 DSTATCOM 限流保护补偿策略。

## 3 新型 DSTATCOM 不平衡补偿策略

本文提出的三相四线制 DSTATCOM 不平衡补偿策略主要由电流相量检测、零序优先算法和电流跟随控制三部分组成。其中,电流相量检测模块用于检测负荷电流中的负序、零序相量的有效值和相角;零序优先算法遵循零序优先补偿的原则和容量限制,生成参考电流值;电流跟随环节使 DSTATCOM 输出补偿电流跟随参考电流。

### 3.1 不平衡电流负序、零序相量检测

为灵活补偿负序和零序电流,需先对不平衡负荷电流进行负序和零序的解耦计算。

设三相负荷电流如式(2)所示。

$$\begin{aligned}
i_{La} &= \sqrt{2}I_p \cos(\omega t + \varphi_p) + \\
&\quad \sqrt{2}I_n \cos(\omega t + \varphi_n) + \sqrt{2}I_0 \cos(\omega t + \varphi_0) \\
i_{Lb} &= \sqrt{2}I_p \cos(\omega t + \varphi_p - 120^\circ) + \\
&\quad \sqrt{2}I_n \cos(\omega t + \varphi_n + 120^\circ) + \sqrt{2}I_0 \cos(\omega t + \varphi_0) \\
i_{Lc} &= \sqrt{2}I_p \cos(\omega t + \varphi_p + 120^\circ) + \\
&\quad \sqrt{2}I_n \cos(\omega t + \varphi_n - 120^\circ) + \sqrt{2}I_0 \cos(\omega t + \varphi_0)
\end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $I_p$ 、 $I_n$ 、 $I_0$  分别为负荷电流正序分量、负序分量和零序分量的有效值;  $\varphi_p$ 、 $\varphi_n$ 、 $\varphi_0$  分别为负荷电流正序分量、负序分量和零序分量的相角。

根据对称分量法, 负序 dq 变换可表示为:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} i_{dn} & i_{qn} \end{bmatrix}^T &= \mathbf{C}_{dq} \begin{bmatrix} i_{La} & i_{Lb} & i_{Lc} \end{bmatrix}^T \\
\mathbf{C}_{dq} &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\omega t & \cos(\omega t + 120^\circ) & \cos(\omega t - 120^\circ) \\ -\sin\omega t & -\sin(\omega t + 120^\circ) & -\sin(\omega t - 120^\circ) \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $i_{dn}$ 、 $i_{qn}$  分别为经过负序 dq 变换后的 d 轴和 q 轴分量。

由于负序 dq 变换是以  $-\omega$  角频率进行的顺时针旋转变换, 经过负序 dq 变换后, 负荷电流正序分量将变为二倍频分量; 负序分量将变为直流分量; 零序分量将变为零。因此, 将  $i_{dn}$  和  $i_{qn}$  经过低通滤波后, 可得负序直流分量  $\bar{i}_{dn}$  和  $\bar{i}_{qn}$ :

$$\begin{cases} \bar{i}_{dn} = \sqrt{2}I_n \cos\varphi_n \\ \bar{i}_{qn} = \sqrt{2}I_n \sin\varphi_n \end{cases} \quad (4)$$

故负序电流的有效值和相角分别为:

$$I_n = \sqrt{\bar{i}_{dn}^2 + \bar{i}_{qn}^2} / \sqrt{2} \quad (5)$$

$$\varphi_n = \arctan(\bar{i}_{qn} / \bar{i}_{dn}) \quad (6)$$

零序电流  $i_0$  可由式(7)计算:

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_{La} + i_{Lb} + i_{Lc}) \quad (7)$$

此处采用  $\alpha\beta$  检测法<sup>[13]</sup> 计算零序电流有效值和相角。设  $\alpha\beta$  坐标系下  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$  分量分别为:

$$\begin{cases} i_\alpha = i_0 = \sqrt{2}I_0 \cos(\omega t + \varphi_0) \\ i_\beta = -\frac{i'_\alpha}{\omega} = \sqrt{2}I_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \end{cases} \quad (8)$$

将  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$  从静止的  $\alpha\beta$  坐标系变换到同步旋转的 dq 坐标系, 变换矩阵为:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} i_{d0} & i_{q0} \end{bmatrix}^T &= \mathbf{C}_{dq0} \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix}^T \\
\mathbf{C}_{dq0} &= \begin{bmatrix} \cos\omega t & \sin\omega t \\ -\sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $i_{d0}$ 、 $i_{q0}$  分别为经过 dq 变换后的 d 轴和 q 轴分量, 经过低通滤波后得到零序直流分量  $\bar{i}_{d0}$  和  $\bar{i}_{q0}$ :

$$\begin{cases} \bar{i}_{d0} = \sqrt{2}I_0 \cos\varphi_0 \\ \bar{i}_{q0} = \sqrt{2}I_0 \sin\varphi_0 \end{cases} \quad (10)$$

因此, 零序电流的有效值和相角分别为:

$$I_0 = \sqrt{\bar{i}_{d0}^2 + \bar{i}_{q0}^2} / \sqrt{2} \quad (11)$$

$$\varphi_0 = \arctan(\bar{i}_{q0} / \bar{i}_{d0}) \quad (12)$$

### 3.2 零序优先算法

零序优先算法利用 3.1 节检测到的负序、零序电流的有效值和相角, 遵循零序优先补偿的原则 (实际中可根据需要灵活选择优先补偿零序或优先补偿负序, 此处以零序优先补偿为例进行介绍), 生成三相参考电流, 如图 2 所示。图 2 中,  $I_{ns}$ 、 $I_{0s}$  分别为根据行业标准折算出的负序电流和零序电流达标值;  $i_a^*$ 、 $i_b^*$ 、 $i_c^*$  为三相参考电流。该算法由夹角计算、补偿边界计算、模式判断和参考电流生成四部分组成。

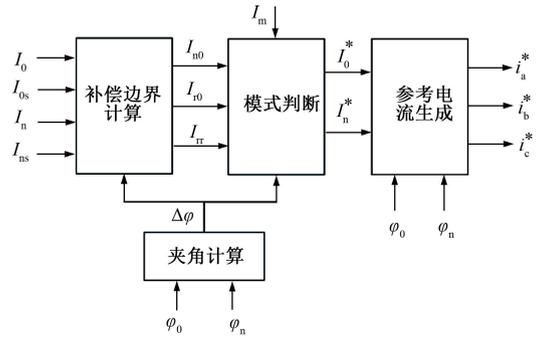


图2 零序优先的补偿算法

Fig. 2 Compensation algorithm for zero sequence first

#### 3.2.1 夹角计算

在 DSTATCOM 同时补偿零序电流和负序电流的工况下, 三相补偿电流有效值不同。有效值最大的那一相对应的补偿电流有可能超过装置额定电流, 该相负序电流相量与零序电流相量的夹角最小。

设零序电流相量与 a 相负序电流相量的夹角为  $D = |\varphi_0 - \varphi_n| \in [0, 360^\circ]$ , 并设零序电流与三相负序电流相量的最小夹角为  $\Delta\varphi$ 。  $\Delta\varphi$  随  $D$  的变化而改变, 其变化规律如图 3 所示 (图 3 中  $\varphi_n = 30^\circ$ )。当零序电流相量  $I_0$  处于图 3 中某个扇区时,  $\Delta\varphi$  取该扇区对应的数值, 即:

$$\Delta\varphi = \begin{cases} D & 0 \leq D < 60^\circ \\ 120^\circ - D & 60^\circ \leq D < 120^\circ \\ D - 120^\circ & 120^\circ \leq D < 180^\circ \\ 240^\circ - D & 180^\circ \leq D < 240^\circ \\ D - 240^\circ & 240^\circ \leq D < 300^\circ \\ 360^\circ - D & 300^\circ \leq D < 360^\circ \end{cases}$$

$$= \min(D, |D - 120^\circ|, |D - 240^\circ|, |D - 360^\circ|) \quad (13)$$

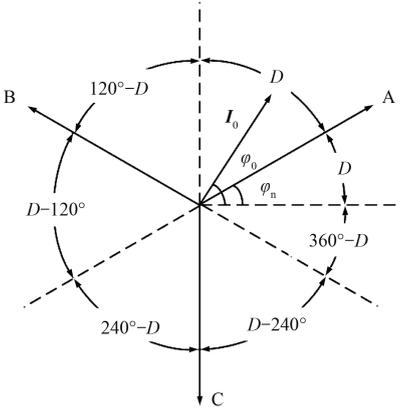


图3 零序电流相量与负序电流相量的最小夹角

Fig.3 Minimum angle between zero sequence current phasor and negative sequence current phasor

### 3.2.2 补偿边界计算

记  $I_{nr} = I_n - I_{ns}$ ,  $I_{or} = I_0 - I_{os}$ , 则  $I_{nr}$  为将系统负序电流补偿至达标所需的补偿量,  $I_{or}$  为将系统零序电流补偿至达标所需的补偿量。当补偿电流恰好能完全补偿负荷零序电流和负序电流时, 零序电流补偿量为  $I_0$ , 负序电流补偿量为  $I_n$ 。由余弦定理, 三相补偿电流最大值为:

$$I_{n0} = \sqrt{I_n^2 + I_0^2 + 2I_n I_0 \cos(\Delta\varphi)} \quad (14)$$

当补偿电流恰好能完全补偿负荷零序电流, 并将负序电流补偿至达标时, 零序电流补偿量为  $I_0$ , 负序电流补偿量为  $I_{nr}$ , 三相补偿电流最大值为:

$$I_0 = \sqrt{I_{nr}^2 + I_0^2 + 2I_{nr} I_0 \cos(\Delta\varphi)} \quad (15)$$

当补偿电流恰好能将负荷零序电流和负序电流补偿至达标时, 零序电流补偿量为  $I_{or}$ , 负序电流补偿量为  $I_{nr}$ , 三相补偿电流最大值为:

$$I_{nr} = \sqrt{I_{nr}^2 + I_{or}^2 + 2I_{nr} I_{or} \cos(\Delta\varphi)} \quad (16)$$

图4为上述3个补偿电流值对应的补偿边界相量, 这3个补偿边界将用于下面的模式判断。

### 3.2.3 模式判断

本文所提补偿算法中, 补偿优先级为: 补偿零序电流至达标 > 补偿负序电流至达标 > 补偿达标值以

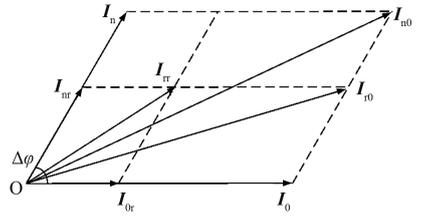


图4 零序优先算法的3个补偿边界

Fig.4 3 compensating boundaries of zero sequence first algorithm

下的零序电流 > 补偿达标值以下的负序电流。结合补偿优先级的定义和补偿容量的限制, 所提补偿算法共存在5种补偿模式, 如图5所示。图5中, 以  $r = I_m$  为半径的圆与补偿模式线段的交点即为补偿向量  $I_c$ , 交点所在位置决定了相应的补偿模式。例如, 图5中补偿算法对应于补偿模式III。另外, 当  $I_m \geq I_{n0}$  时, 以  $r = I_m$  为半径的圆与补偿模式线段可能没有交点, 此时补偿装置工作在补偿模式V, 该模式下补偿向量  $I_c$  为图4中  $I_{n0}$ 。

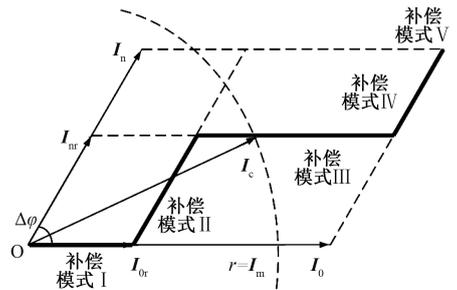


图5 零序优先算法的5种补偿模式

Fig.5 5 compensation mode for zero sequence first algorithm

由补偿模式可确定零序电流和负序电流补偿量:

(1) 补偿模式I: 当  $I_m < I_{or}$  时, 装置额定容量不足以将零序电流补偿至达标, 全部容量均用于补偿零序电流, 故零序电流和负序电流补偿量为:

$$\begin{cases} I_0^* = I_m \\ I_n^* = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $I_0^*$  为零序参考电流有效值;  $I_n^*$  为负序参考电流有效值。

(2) 补偿模式II: 当  $I_{or} \leq I_m < I_{nr}$  时, 装置额定容量仅足以将零序电流补偿至达标, 剩余容量用于补偿负序电流, 由余弦定理, 得:

$$\begin{cases} I_0^* = I_{or} \\ I_n^* = \sqrt{I_m^2 - I_{or}^2 \sin^2(\Delta\varphi)} - I_{or} \cos(\Delta\varphi) \end{cases} \quad (18)$$

(3) 补偿模式Ⅲ: 当  $I_{nr} \leq I_m < I_{i0}$  时, 装置额定容量可将零序电流和负序电流都补偿至达标, 且剩余容量用于补偿零序电流, 故:

$$\begin{cases} I_0^* = \sqrt{I_m^2 - I_{nr}^2 \sin^2(\Delta\varphi)} - I_{nr} \cos(\Delta\varphi) \\ I_n^* = I_{nr} \end{cases} \quad (19)$$

(4) 补偿模式Ⅳ: 当  $I_{i0} \leq I_m < I_{n0}$  时, 额定容量可完全补偿零序电流, 并将负序电流补偿至达标, 且剩余容量用于补偿负序电流, 故:

$$\begin{cases} I_0^* = I_0 \\ I_n^* = \sqrt{I_m^2 - I_0^2 \sin^2(\Delta\varphi)} - I_0 \cos(\Delta\varphi) \end{cases} \quad (20)$$

(5) 补偿模式Ⅴ: 当  $I_m \geq I_{n0}$  时, 额定容量可完全补偿零序电流和负序电流, 故:

$$\begin{cases} I_0^* = I_0 \\ I_n^* = I_n \end{cases} \quad (21)$$

### 3.2.4 参考电流生成

根据 3.2.3 节得到的零序参考电流和负序参考电流有效值, 结合零序电流和负序电流相角, 可生成 DSTATCOM 三相补偿参考电流。各相参考电流为对应相零序参考电流  $i_{a0}^*$ 、 $i_{b0}^*$ 、 $i_{c0}^*$  和负序参考电流  $i_{an}^*$ 、 $i_{bn}^*$ 、 $i_{cn}^*$  以及有功参考电流  $i_{pa}^*$ 、 $i_{pb}^*$ 、 $i_{pc}^*$  三者之和, 即:

$$\begin{cases} i_a^* = i_{a0}^* + i_{an}^* + i_{pa}^* = \sqrt{2}I_0^* \cos(\omega t + \varphi_0) + \\ \quad \sqrt{2}I_n^* \cos(\omega t + \varphi_n) + \sqrt{2}I_p^* \cos\omega t \\ i_b^* = i_{b0}^* + i_{bn}^* + i_{pb}^* \\ = \sqrt{2}I_0^* \cos(\omega t + \varphi_0) + \sqrt{2}I_n^* \cos(\omega t + \varphi_n + 120^\circ) + \\ \quad \sqrt{2}I_p^* \cos(\omega t - 120^\circ) \\ i_c^* = i_{c0}^* + i_{cn}^* + i_{pc}^* \\ = \sqrt{2}I_0^* \cos(\omega t + \varphi_0) + \sqrt{2}I_n^* \cos(\omega t + \varphi_n - 120^\circ) + \\ \quad \sqrt{2}I_p^* \cos(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (22)$$

式中,  $I_p^*$  为有功电流有效值, 用于补偿装置损耗。模式判断环节未考虑有功电流占用装置容量, 因为有功电流一般不超过装置额定电流 3%, 可忽略不计。

### 3.3 电流跟随

采用电流跟随环节, 使 DSTATCOM 输出电流跟随 3.2 节得到的参考电流瞬时值。图 6 为电流跟随控制框图。

图 6 中,  $u_k$  为并网点前馈电压, 比例系数  $2/U_{dc}$  为对逆变器线性放大环节进行的“归一化”处理;  $G_C(s)$  为电流调节器, 采用准比例谐振<sup>[14]</sup>控制, 即:

$$G_C(s) = K_p + \frac{2K_R\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (23)$$

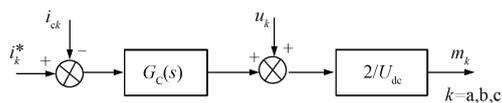


图 6 电流跟随控制框图

Fig. 6 Control block diagram of current follower

式中,  $K_p$  为比例参数;  $K_R$  为谐振参数;  $\omega_0$  为谐振频率, 取电网频率 50Hz;  $\omega_c$  为截止频率, 决定控制器的带宽, 但不影响谐振频率处的控制器增益。

## 4 数值仿真验证补偿策略

本文对 50kV·A 额定容量 DSTATCOM 进行了 MATLAB 数值仿真。数值仿真中, 以系统 a 相正序电压为参考电压, DSTATCOM 额定电流为基值, 并假设负荷负序电流分量标幺值实部为 0.5、虚部为 0 (即  $\varphi_n = 0^\circ$ ), 零序电流分量标幺值为 0~1.5、相角为  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 负序电流和零序电流达标值均设为 0.25, 则比例限流策略和本文所提的基于容量限幅的不平衡补偿策略 (以下简称“零序优先策略”) 的数值仿真结果如图 7~图 9 所示。

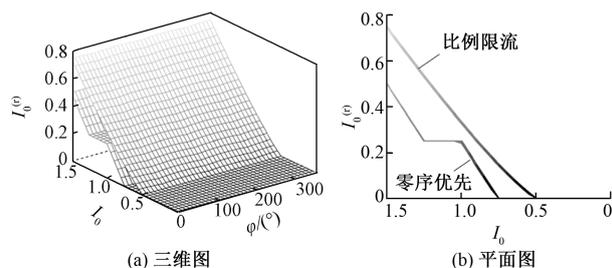


图 7 比例限流和零序优先策略的系统零序电流分量

Fig. 7 System zero sequence current component of proportioning current limiting and zero sequence first strategy

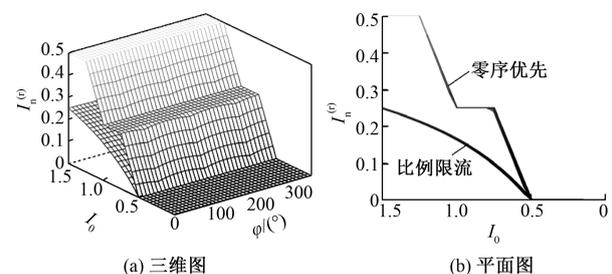


图 8 比例限流和零序优先策略的系统负序电流分量

Fig. 8 System negative sequence current component of proportioning current limiting and zero sequence first strategy

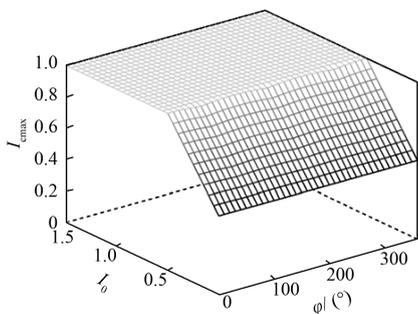


图9 比例限流和零序优先策略的补偿电流最大值

Fig.9 Maximum compensating current of proportioning current limiting and zero sequence first strategy

图7中,  $I_0$  和  $\varphi_0$  分别为负荷零序电流标幺值和相角;  $I_0^{(r)}$  为系统零序电流分量。为直观比较比例限流策略和零序优先策略的系统零序电流分量, 将图7(a)所示三维图投影到  $I_0^{(r)} - I_0$  二维平面, 得到图7(b)。同理, 可得图8所示系统负序电流分量  $I_n^{(r)}$  的三维图和平面图。

由图7和图8可知, 零序优先策略对应的系统零序电流分量总是小于比例限流策略, 对应的系统负序电流分量总是大于比例限流策略。进一步观察发现, 当  $I_0 \in [0.89, 1.0]$  时, 零序优先策略对应的系统零序电流分量和系统负序电流分量都在达标范围(0~0.25)内, 而比例限流策略对应的系统零序电流分量超过达标值, 这是因为零序优先策略得益于负荷电流负序、零序分量的解耦计算, 能灵活地设定负序电流和零序电流补偿量。在  $I_0 \in [0.89, 1.0]$  时, 相比于比例限流策略, 采用零序优先策略可使系统不平衡电流零序和负序分量均满足行业标准, 对不平衡电流和补偿效果优于比例限流策略。

图9中,  $I_{\max}$  为 DSTATCOM 三相补偿电流最大值。比例限流策略和零序优先策略的补偿电流最大值图像重合, 且标幺值最大不超过 1.0, 故两种策略均可避免设备补偿过流。

## 5 PSCAD 仿真验证补偿策略

本文建立了 50kV·A 额定容量 DSTATCOM 的 PSCAD 模型, 以验证所提不平衡补偿策略有效性, 电气参数如下: 配电变压器为 10kV/0.4kV, 采用 Y/yn0 接线, 额定容量 160kV·A; DSTATCOM 直流母线电压 750V, 滤波电抗  $L$  为 0.4mH, 滤波电抗  $L_n$  为 0.24mH, 滤波电容  $C$  为 60 $\mu$ F, PWM 开关频率为 6.4kHz。

仿真时间设置如下:  $0 < t < 0.05s$ , DSTATCOM 未投入进行补偿;  $0.05s < t < 0.15s$ , DSTATCOM 投入补偿, 且额定容量足以补偿全部不平衡电流;  $0.15s < t < 0.5s$ , DSTATCOM 额定容量不足以补偿全部不平衡电流。仿真中, 负荷采用电流源形式, 负荷不平衡工况设置见表1。其中, I、II、III、IV 分别对应于时间:  $0 < t < 0.05s$ ,  $0.05s < t < 0.15s$ ,  $0.15s < t < 0.3s$ ,  $0.3s < t < 0.5s$ 。此外, 根据 Q/GDW 1519-2014《配电网运维规程》及 DL/T 1102-2009《配电变压器运行规程》规定, 可计算出: 负序电流达标值  $I_{ns} = 22A$ , 零序电流达标值  $I_{0s} = 21A$ 。DSTATCOM 额定电流  $I_m = 76A$ 。

表1 负荷不平衡工况

Tab.1 Unbalanced condition of load

电流	I	II	III	IV
正序电流/A	141.4	141.4	141.4	141.4
负序电流/A	35.4	35.4	28.3	84.9
零序电流/A	35.4	35.4	84.9	84.9

采用零序优先策略仿真波形如图10所示, 图10中波形依次为负荷电流, 系统电流, DSTATCOM 补偿电流, 系统电流正序、负序和零序分量, 三相补偿电流有效值。表2为对应的系统电流正序、负序、零序分量和 DSTATCOM 三相补偿电流具体数值。

表2 零序优先策略的补偿效果

Tab.2 Compensation effect of zero sequence first strategy

(单位: A)

电流	I	II	III	IV	
系统 电流	正序	142.1	142.4	142.9	142.8
	负序	35.5	0.4	21.9	73.6
	零序	35.4	0.5	15.6	20.6
补偿 电流	a相	0.7	70.4	75.5	75.6
	b相	0.7	34.3	66.3	59.3
	c相	0.8	34.7	66.4	59.5

由图10和表2可知, 采用零序优先策略,  $0.05s < t < 0.15s$  时, DSTATCOM 工作在补偿模式V, 能完全补偿负荷负序和零序电流;  $0.15s < t < 0.3s$  时, DSTATCOM 工作在补偿模式III, 能将系统负序电流和零序电流都补偿至满足行业标准;  $0.3s < t < 0.5s$  时, DSTATCOM 工作在补偿模式II, 仅能将系统零序电流补偿至满足行业标准。此外, 三相补偿电流均未超过 DSTATCOM 额定电流。

采用比例限流策略的仿真波形如图11所示, 表3为对应的系统电流正序、负序、零序分量和 DSTATCOM 三相补偿电流的具体数值。

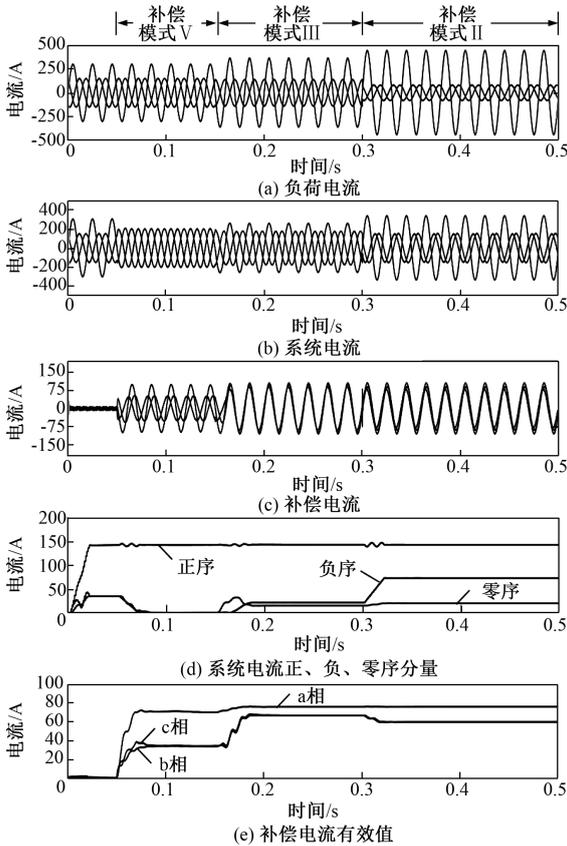


图 10 零序优先策略的仿真波形

Fig. 10 Simulation results of zero sequence first strategy

表 3 比例限流策略的补偿效果

Tab. 3 Compensation effect of proportioning current limiting strategy

		(单位: A)			
电流		I	II	III	IV
系统 电流	正序	142.1	142.4	142.7	142.4
	负序	35.5	0.4	10.6	48.2
	零序	35.4	0.5	30.9	48.2
补偿 电流	a相	0.7	70.4	74.9	74.9
	b相	0.7	34.3	47.3	35.1
	c相	0.8	34.7	47.6	35.4

由图 11 和表 3 可知,采用比例限流策略,0.05s < t < 0.15s 时, DSTATCOM 能完全补偿负荷负序和零序电流; 0.15s < t < 0.3s 时, DSTATCOM 仅能将系统负序电流补偿至满足行业标准; 0.3s < t < 0.5s 时, DSTATCOM 无法将系统负序电流或零序电流补偿至满足行业标准。此外,三相补偿电流通常未超过 DSTATCOM 额定电流,但在负载突变后的一段时间内无法保证补偿电流在允许范围内。

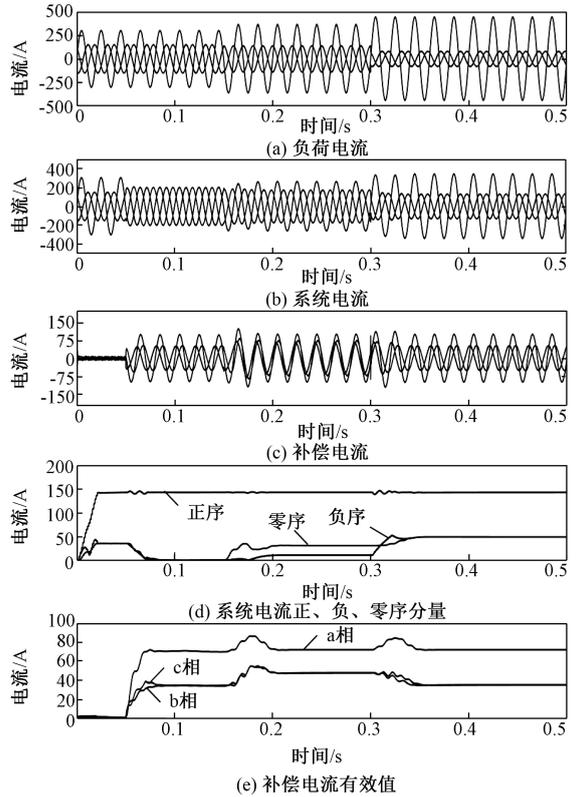


图 11 比例限流策略的仿真波形

Fig. 11 Simulation results of proportioning current limiting strategy

## 6 结论

(1) 当补偿容量大于额定容量时,由于零序优先策略可灵活地设定负序电流和零序电流补偿量,故相比于比例限流策略,零序优先策略能更有效地利用装置容量,使系统不平衡电流零序和负序分量尽可能地满足行业标准。

(2) 零序优先策略和比例限流策略均能避免设备过流。相比于比例限流策略,零序优先策略的限流效果无时延。

## 参考文献 (References):

[1] 杨振宇, 赵剑锋, 唐国庆 (Yang Zhenyu, Zhao Jianfeng, Tang Guoqing). 并联型有源电力滤波器限流补偿策略研究 (Research on current limiting compensation scheme of shunt APF) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2006, 26 (3): 21-25.

[2] 曹尚, 常鲜戎, 王辉云 (Cao Shang, Chang Xianrong, Wang Huiyun). D-STATCOM 实时同比例限流保护的研究 (Research of real-time current-limiting protection with the same proportion for D-STATCOM) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2014, 52 (8): 41-46.

- [ 3 ] Orts-Grau S, Gimeno-Sales F J, Segui-Chilet S, et al. Selective shunt active power compensator applied in four-wire electrical systems based on IEEE Std. 1459 [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (4): 2563-2574.
- [ 4 ] Orts-Grau S, Gimeno-Sales F J, Segui-Chilet S, et al. Selective compensation in four-wire electric systems based on a new equivalent conductance approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56 (8): 2862-2874.
- [ 5 ] Singh B, Verma V. Selective compensation of power-quality problems through active power filter by current decomposition [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (2): 792-799.
- [ 6 ] Singh B, Verma V, Solanki J. Neural network-based selective compensation of current quality problems in distribution system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54 (1): 53-60.
- [ 7 ] Cao W, Wu M, Zhao J, et al. An improved current-limiting strategy for shunt active power filter (SAPF) using particle swarm optimization (PSO) [A]. 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [C]. San Antonio, TX, USA, 2018. 494-498.
- [ 8 ] Alfonso-Gil J C, Pérez E, Ariño C, et al. Optimization algorithm for selective compensation in a shunt active power filter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (6): 3351-3361.
- [ 9 ] Wang L, Lam C, Wong M. Selective compensation of distortion, unbalanced and reactive power of a thyristor-controlled LC-coupling hybrid active power filter (TCLC-HAPF) [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (12): 9065-9077.
- [ 10 ] 魏应冬, 姜齐荣, 韩英铎, 等 (Wei Yingdong, Jiang Qirong, Han Yingduo, et al.). 基于无功与负序对称解耦的 RUPQC 最优补偿策略 (Optimal compensation strategy of RUPQC based on reactive power and negative sequence components symmetrical decoupling) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2009, 33 (16): 55-60.
- [ 11 ] 魏应冬, 姜齐荣, 韩英铎, 等 (Wei Yingdong, Jiang Qirong, Han Yingduo, et al.). 以牵引变电站灵活补偿为目标的铁道统一电能质量控制器容量综合配置 (Comprehensive capacity configuration of railway unified power quality controller aiming at flexible compensation for traction substation) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2010, 34 (1): 15-21.
- [ 12 ] 朱永强, 王腾飞 (Zhu Yongqiang, Wang Tengfei). 应用于 DSTATCOM 的负序电流优先补偿策略 (A negative sequence current preferred compensation strategy applied in DSTATCOM) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2012, 36 (8): 106-110.
- [ 13 ] 瞿硕, 黄纯, 江亚群, 等 (Qu Shuo, Huang Chun, Jiang Yaqun, et al.). DVR 电压暂降检测新方法 (A new detection method of voltage sag applied in DVR) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (4): 234-239.
- [ 14 ] 汪玉凤, 王济东, 佟丽新, 等 (Wang Yufeng, Wang Jidong, Tong Lixin, et al.). 基于自适应准 PR 控制器的 MMC 环流控制策略研究 (Research on MMC circulation control strategy based on adaptive quasi-PR controller) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (12): 24-31.

## Unbalance compensation strategy of three-phase four-wire DSTATCOM based on capacity limitation

ZHAO Li<sup>1</sup>, WEI Ying-dong<sup>1</sup>, JIANG Qi-rong<sup>1</sup>, MA Hui-yuan<sup>2</sup>, YU Xi-juan<sup>2</sup>, YUAN Zhi-chang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

**Abstract:** In order to flexibly compensate plenty of unbalanced current in low voltage distribution system and avoid device overcurrent, an unbalance compensation strategy of three-phase four-wire DSTATCOM based on capacity limitation is proposed. When the capacity of DSTATCOM is not enough to compensate all unbalanced current, zero sequence current will be compensated first to satisfy industry standard for neutral current of distribution transformer. Meanwhile, negative sequence current is compensated to the full extent. Compared with proportioning current limiting protection, the proposed strategy can avoid overcurrent without time delay and flexibly set compensation of negative sequence current and zero sequence current. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by MATLAB numerical simulation and PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation.

**Key words:** unbalance compensation; three-phase four-wire system; limited capacity; zero sequence first