

不对称电压下不平衡负载的平衡化补偿方法

王 一, 刘建政

(清华大学 电机工程与应用电子技术系 电气系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 研究电力系统电压不对称情况下不平衡负载的补偿方法, 指出非理想系统电压下 Steinmetz 平衡分量补偿方法无法实现三相不平衡负载电流平衡补偿。在 Steinmetz 理想补偿理论上增加一个无功补偿自由度, 提出在系统电压不对称情况下将三相负载电流补偿为单位功率因数或正序补偿电流 2 种情况下补偿导纳的计算方法。在此基础上给出了用于三角接 STATCOM 在任意系统电压下补偿不平衡负载的系统控制方案, 具有快速动态响应性能并保持系统稳定, 通过 PSCAD/EMTDC 仿真及现场工程试验验证了所提方法的有效性。

关键词: 非理想系统电压; 不平衡负载; 单位功率因数补偿; 正序补偿

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.013

0 引言

目前电力系统中存在着大量的不对称负荷, 大功率单相负载、电气化铁路牵引供电、配电网三相负荷不平衡等使得电力系统三相负荷不平衡^[1-3], 对电力系统的安全运行以及电能质量造成很大的影响。

对于系统电压平衡情况下不平衡负荷的补偿方法已有较多研究。文献[4-5]首先提出 Steinmetz 电纳平衡补偿理论, 指出在三相三线系统电压平衡情况下任意不平衡负荷可以通过纯无源网络补偿成为三相对称且为单位功率因数的平衡负载, 并提出通过实时采样的电压、电流数据计算补偿电纳的方法。Steinmetz 电纳平衡补偿理论是静止无功补偿器(SVC)不平衡负荷补偿的理论基础, 文献[6-8]在此基础上提出工程化实现方法。

基于可关断器件的静止同步补偿器(STATCOM)^[9-10]在动态响应速度及补偿性能上相比 SVC 有更大的优势^[11-12], 在电力系统中链式 STATCOM 已有了广泛的应用。对于不平衡负荷补偿情况, 文献[13-16]提出星接 STATCOM 通过零序电压注入平衡三相有功功率的控制方法, 但是该方法负序补偿能力十分有限, 在系统电压不对称情况下难以实现且零序分量的计算方法十分复杂。文献[17]讨论了非理想系统电压下星接 STATCOM 各相功率分布情况, 通过调节三相电容功率平衡间接实现不平衡补偿, 系统补偿能力有限且响应速度慢。

文献[18-20]基于 Steinmetz 电纳平衡补偿理论提出三角接 STATCOM 通过三相链结角内环流平衡三相有功功率的控制方法, 为不平衡负荷的补偿提供了新的思路。文献[21-22]对电纳平衡方法在不对称电压条件下的修正进行了讨论, 但其理论推导

并不完整, 不能在非理想电压下有效补偿。

文献[23]分析了非理想电压下 Steinmetz 电纳平衡补偿理论存在的问题, 指出在该系统电压情况下 Steinmetz 理论不再适用, 提出了采用电网电流闭环补偿的控制方法对补偿电流进行修正, 应用三角接 STATCOM 实现非理想电压下的不对称负载补偿, 但该方法在动态响应特性和系统稳定性上存在不足。

本文充分扩展了 Steinmetz 电纳平衡补偿理论, 分析非理想电压下不平衡负载补偿原理, 针对单位功率因数和正序对称不同补偿目标给出补偿无功指令的详细计算方法, 使 SVC 及三角接链式 STATCOM 可以有效应用于非理想系统电压下不平衡负荷的补偿, 所提方法为开环控制, 系统动态响应速度快, 稳定性高。最后本文通过 PSCAD/EMTDC 仿真算例及现场试验进一步验证了所提理论的正确性。

1 Steinmetz 电纳平衡补偿理论

系统电压对称情况下, 任意三相负载都可以表示为三角接的导纳形式, 如图 1(a)所示, 三相负载导纳各不相同, 分别表示为 Y_1^{ab} 、 Y_1^{bc} 、 Y_1^{ca} 。

$$Y_1^k = G_1^k + jB_1^k \quad (1)$$

其中, $k=ab, bc, ca$; G_1^k 、 B_1^k 分别为电导和电纳。

根据 Steinmetz 电纳平衡补偿理论, 首先, 如图 1(b)所示在各相负载上并联无功补偿, 得到纯电阻形式的负载, 如图 1(c)所示。

其次, 考虑如图 1(d)所示单相纯电阻负载的平衡补偿, 如图 1(e)所示在另外两相分别加入电容和电感, 其中 bc 之间加入电容, ca 之间加入电感:

$$B_r^{bc} = \frac{G_1^{ab}}{\sqrt{3}}, \quad B_r^{ca} = \frac{-G_1^{ab}}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

在正序对称系统电压下, 图 1(e)即可等效成为

图 1(f)所示正序对称的星接纯有功负载。

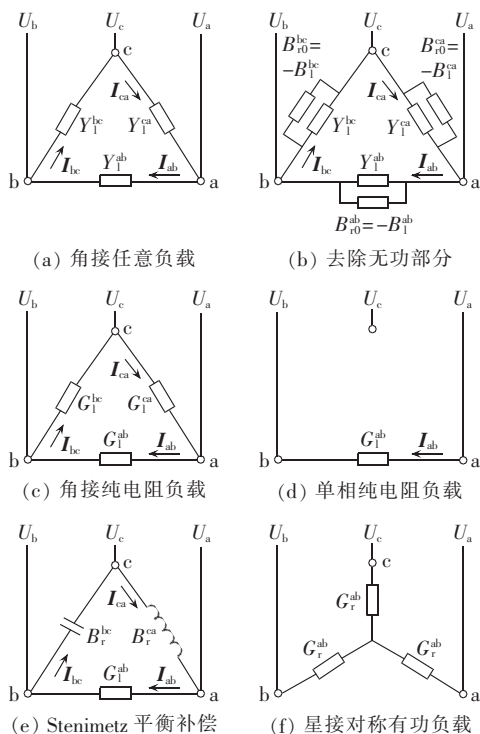


图 1 三相角接负载有功化补偿

Fig.1 Active power compensation for three-phase load in delta-connection mode

最后,分别对图 1(c)三相负载平衡化,即可得到三相对称的星接纯有功负载。

2 非理想电压下 Steinmetz 理论

非理想系统电压包含正序电压和负序电压,第 1 节所述 Steinmetz 电纳平衡补偿理论成立的前提为系统电压对称,即为正序电压情况,其单相有功负载补偿矢量图如图 2(a)所示,其中 I_R 为电阻电流, I_{1bc} 和 I_{1ca} 为无功补偿电流,通过矢量合成得到对称正序有功相电流 I_a, I_b, I_c 。当系统电压为负序时,如图 2(b)所示,同样的补偿电流作用下,矢量合成后相电流依然不对称。

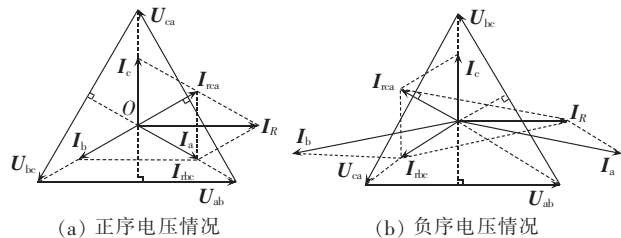


图 2 正负序系统电压下单相负载平衡化补偿矢量图

Fig.2 Vector diagram of balanced compensation for single-phase load in positive- and negative-sequence system voltages

非理想系统电压可以分解为正序电压与负序电压的矢量叠加,由线性系统叠加原理可知,相间无功

补偿电流是正、负序电压分别作用在补偿电纳上产生电流的矢量和,因此可知补偿后的相电流 I_a, I_b, I_c 依然不对称。

通过以上分析可以得到 3 个结论:

- 实现单相纯阻性负载的平衡补偿即可解决任意三相不平衡负荷的平衡补偿;
- 理想 Steinmetz 补偿理论通过在另外两相间加入等效电纳解决单相纯阻性负载的平衡补偿,当系统电压不对称时 Steinmetz 补偿无法达到平衡化效果;
- 非理想电压下无法仅通过无功补偿将任意不平衡负载补偿为正序对称且为单位功率因数。

3 非理想电压下平衡补偿原理

电力系统中系统电压存在着一定的不对称,系统出现异常情况时不对称情况将更加显著,非理想电压下不平衡负荷的补偿十分必要。

本文着重研究非理想电压下单相纯阻性负载的平衡补偿方法,理想 Steinmetz 理论的补偿电纳加在了没有负载的两相间上,本文在三相相间同时加入等效电纳补偿实现单相纯电阻负载的补偿,补偿后三相相电流可以为单位功率因数或正序对称,通过推导可以发现,理想 Steinmetz 理论是本文得出结论的一个特例。

3.1 单位功率因数补偿

考虑中性点不接地的非理想电压系统如图 3 所示,系统线电压 U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} 构成矢量三角形 ABC , ab 相间为纯电阻负载,负载电流为 I_R , bc, ca 相间断路。

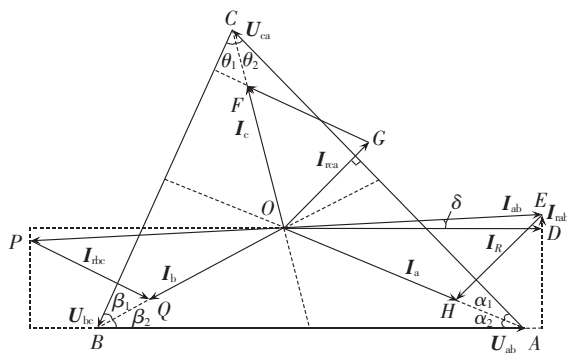


图 3 单位功率因数补偿示意图

Fig.3 Schematic diagram of unity power factor compensation

本文提出单位功率因数补偿方法,首先在 ab 相间加入无功电流 I_{1ab} ,使得负载线电流由原来的 I_R 变为 I_{ab} ,然后分别在 bc, ca 相间加入无功补偿电流 I_{1bc} 和 I_{1ca} ,调节 I_{1ab} 的幅值和方向,使得补偿后三相相电流 I_a, I_b, I_c 分别与三相电压矢量同相,即负载电流功率因数为 1,图 3 中 O 点为 $\triangle ABC$ 的重心,本文考虑

系统相电压无零序分量,根据矢量合成可知 $\vec{OA}$ 、 $\vec{OB}$ 、 $\vec{OC}$ 分别代表系统三相相电压矢量方向。

根据图 3 中矢量关系,可以推得三相无功补偿电流的幅值和方向。根据正弦定理,可以得到:

$$\begin{cases} \tan \theta_1 = \frac{\sin \angle B \times \sin \angle C}{\sin \angle A + \sin \angle B \times \cos \angle C} \\ \tan \alpha_1 = \frac{\sin \angle C \times \sin \angle A}{\sin \angle C + \sin \angle B \times \cos \angle A} \\ \tan \beta_1 = \frac{\sin \angle C \times \sin \angle B}{\sin \angle A + \sin \angle C \times \cos \angle B} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \alpha_1 + \alpha_2 = \angle A \\ \beta_1 + \beta_2 = \angle B \\ \theta_1 + \theta_2 = \angle C \end{cases} \quad (4)$$

在 $\triangle OEH$ 、 $\triangle OPQ$ 、 $\triangle OFG$ 和 $\triangle ODE$ 中,根据正弦定理及三角关系可得:

$$\begin{cases} \frac{|I_{rca}|}{\sin(\delta + \alpha_2)} = \frac{|I_{ab}|}{\sin(\alpha_1 + \frac{\pi}{2})} \\ \frac{|I_{rbc}|}{\sin(\beta_2 - \delta)} = \frac{|I_{ab}|}{\sin(\beta_1 + \frac{\pi}{2})} \\ \frac{|I_{rca}|}{\sin(\frac{\pi}{2} - \theta_1)} = \frac{|I_{rbc}|}{\sin(\frac{\pi}{2} - \theta_2)} \\ |I_{ab}| = \frac{|I_R|}{\cos \delta} \end{cases} \quad (5)$$

将式(3)、(4)代入式(5)求解可得:

$$\tan \delta = \frac{\cos \alpha_1 \cos \theta_1 \sin \beta_2 - \cos \beta_1 \cos \theta_2 \sin \alpha_2}{\cos \alpha_1 \cos \theta_1 \cos \beta_2 + \cos \beta_1 \cos \theta_2 \cos \alpha_2} \quad (6)$$

$$\begin{cases} |I_{rca}| = \frac{|I_R|}{\cos \alpha_1 \cos \delta} \sin(\delta + \alpha_2) \\ |I_{rbc}| = \frac{|I_R|}{\cos \beta_1 \cos \delta} \sin(\beta_2 - \delta) \\ |I_{rab}| = |I_R| \tan \delta \end{cases} \quad (7)$$

由以上分析可知:

a. 非理想电压下单相相间纯电阻负载可以通过在三相相间加入式(7)中计算得到的纯无功电流补偿,补偿后三相负载电流功率因数为 1;

b. I_{rbc} 为容性无功电流, I_{rca} 为感性无功电流, I_{rab} 无功性质取决于非理想电压的不平衡度,图 3 中 I_{rab} 为容性无功电流,当式(6)中 $\tan \delta$ 为负数时 I_{rab} 为感性无功电流;

c. 补偿后的系统三相相电流幅值并不相同,但其方向与对应相电压同相;

d. 当系统电压正序对称时,由式(7)可得式(8)。

$$|I_{rca}| = \frac{|I_R|}{\sqrt{3}}, |I_{rbc}| = \frac{|I_R|}{\sqrt{3}}, |I_{rab}| = 0 \quad (8)$$

式(8)与式(2)的结论相同,即单位功率因数补偿在系统电压为正序对称情况时退化为理想 Steinmetz 平衡补偿。

3.2 正序对称补偿

如图 4 所示,系统电压和负载情况与 3.1 节相同,图 4 中 O 点为 $\triangle ABC$ 的垂心,各相间无功补偿电流分别与对应线电压垂直,本文提出正序对称补偿矢量作图方法如下。

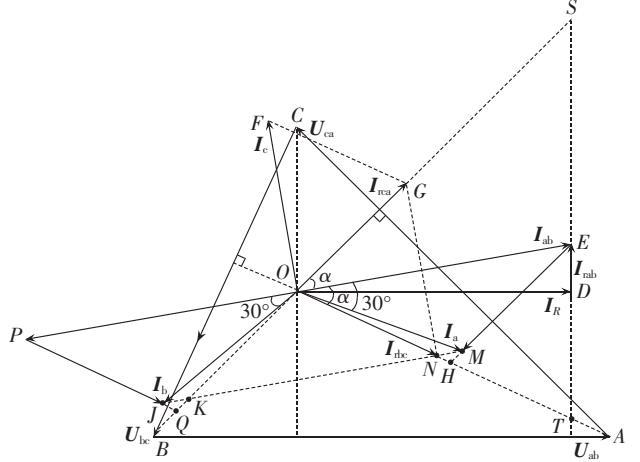


图 4 正序对称补偿示意图

Fig.4 Schematic diagram of symmetrical positive-sequence compensation

a. 在原负载电流 I_R 上加入无功电流 I_{rab} ,使得 $\triangle OHE$ 中 $OH=HE$,其中 EH 与 U_{ca} 垂直, OH 与 U_{bc} 垂直,分别为 ca 、 bc 相间无功电流的方向,同时得到其全等 $\triangle OPQ$, OP 为 OE 的反向延长线。

b. 作 OM 、 OJ 分别与 OE 、 OP 成 30° ,得到 PJ 为 bc 支路无功补偿电流 I_{rbc} , ME 为 ac 支路无功补偿电流 I_{rca} ,且 $|I_{rca}| = |I_{rbc}|$ 。通过矢量合成可得 OM 为补偿后 a 相电流 I_a , OJ 为补偿后 b 相电流 I_b , OF 为补偿后 c 相电流 I_c ,且 $|I_a| = |I_b|$ 。

c. 由 $\triangle OHE$ 可得:

$$|I_c| = 2 \sin \alpha \times |I_{rca}| \quad (9)$$

$\triangle OME$ 中根据正弦定理可得:

$$\frac{|I_a|}{\sin \alpha} = \frac{|I_{rca}|}{\sin 30^\circ} \quad (10)$$

由此可知, $|I_a| = |I_b| = |I_c|$,根据图中角度关系可知 I_a 、 I_b 、 I_c 互差 120° ,即补偿后系统三相电流为正序对称。

根据图中矢量关系,可以推得三相无功补偿电流。由 $\triangle OET$ 可得:

$$\alpha = \frac{\angle C}{2} \quad (11)$$

$\triangle EHT$ 中根据正弦定理可得:

$$\frac{EH}{\sin \angle B} = \frac{HT}{\sin \angle A} \quad (12)$$

$\triangle ODT$ 为直角三角形,可得:

$$OT = |I_R| / \sin \angle B \quad (13)$$

由此可得 OH 、 EH 和 HT ,再由 $\triangle ODE$ 和 $\triangle OME$ 可得:

$$|I_{rab}| = \frac{|I_R|}{\tan\left(\angle A + \frac{\angle C}{2}\right)}$$

$$|I_{rbc}| = |I_{rca}| = \frac{|I_R|}{2\sin\left(\angle A + \frac{\angle C}{2}\right)\sin\left(\frac{\angle C}{2} + 30^\circ\right)} \quad (14)$$

补偿后三相相电流幅值为:

$$|I_a| = |I_b| = |I_c| = \frac{|I_R| \sin\left(\frac{\angle C}{2}\right)}{\sin\left(\angle A + \frac{\angle C}{2}\right)\sin\left(\frac{\angle C}{2} + 30^\circ\right)} \quad (15)$$

由以上分析可知:

a. 非理想电压下单相相间纯电阻负载可以通过在三相相间加入式(14)计算得到的纯无功电流进行补偿,补偿后三相负载电流正序对称;

b. I_{rbc} 为容性无功电流, I_{rca} 为感性无功电流, I_{rab} 无功性质取决于非理想电压的不平衡度,图 4 中 I_{rab} 为容性无功电流,当式(14)中 $\tan(\angle A + \angle C/2)$ 为负时 I_{rab} 为感性无功电流;

c. 补偿后三相负载电流的幅值与系统电压不对称度有关;

d. 当系统电压正序对称时,由式(14)可得式(16)。

$$|I_{rca}| = \frac{|I_R|}{\sqrt{3}}, |I_{rbc}| = \frac{|I_R|}{\sqrt{3}}, |I_{rab}| = 0 \quad (16)$$

式(16)与式(2)结论相同,即正序对称补偿在系统电压正序对称情况时退化为 Steinmetz 平衡补偿。

3.3 小结

根据 3.1 及 3.2 节的理论推导和分析可以得到以下结论:

a. 非理想电压下,对于任意单相相间纯电阻负载可以通过本文提出的 2 种补偿方式达到三相负载电流功率因数为 1 或正序对称;

b. 可以注意到,无论单位功率因数补偿还是正序对称补偿,当三相电压为理想情况时,式(7)和式

(14)都可以简化为与 Steinmetz 电纳平衡补偿理论相同的结论;

c. 本文提出的补偿理论通过在三相相间都注入无功补偿电流达到了在系统电压任意的情况下补偿方案,相对 Steinmetz 电纳平衡理论增加了一个自由度,解决了非理想电压下的补偿问题,是对 Steinmetz 电纳平衡理论的扩充和完善;

d. 在系统电压不平衡工况下,仅通过纯无功补偿不能将系统电流补偿为理想电源下正序对称三相电流,因此本文提出 2 种补偿方案,其中正序对称补偿适用于负载不平衡严重的工况,可以将系统电流补偿为三相正序对称,有效解决负载不平衡对系统造成的线路损耗及功率不平衡情况,而单位功率因数补偿适用于对功率因数指标敏感的工况,可以将系统补偿为单位功率因数状态,有效改善功率因数低下造成的系统损耗。

4 实施方案

以具有优良不对称补偿功能的三角接 STATCOM 为例,本文提出的非理想电压下不平衡负载的补偿方案实现流程如图 5 所示,其中 i_{la}, i_{lb}, i_{lc} 为三相负载电流瞬时值, u_{ab}, u_{bc}, u_{ca} 为三相线电压瞬时值, G_{ab}, G_{bc}, G_{ca} 为三相负载有功分量, $i_{Qab}, i_{Qbc}, i_{Qca}$ 为无功负载电流分量, $i_{Rab}, i_{Rbc}, i_{Rca}$ 为有功负载电流分量, $u_{ab}^+, u_{bc}^+, u_{ca}^+$ 为系统电压正序分量, $u_{ab}^-, u_{bc}^-, u_{ca}^-$ 为系统电压负序分量。

不平衡补偿实现过程主要分以下 3 个部分。

(1)电压正负序分离及锁相。

通过正序、负序同步旋转坐标变换,对三相电压进行正负序分离和锁相,得到相应的三相线电压幅值和相角,三相线电压矢量分别为 $U_{abms} \angle \varphi_1, U_{bcms} \angle \varphi_2, U_{cams} \angle \varphi_3$ 。

(2)负载有功电流分量提取。

实时采样三相负载电流 i_{la}, i_{lb}, i_{lc} ,将星接三相相

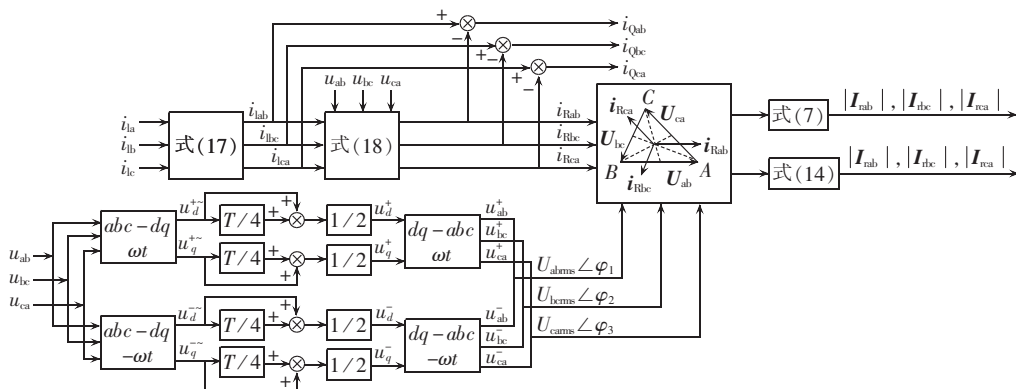


图 5 非理想电压下不平衡负载平衡补偿控制系统框图

Fig.5 Control system of balanced compensation for unbalanced load with nonideal voltage

电流转化为三相线电流。角接三相负载相间存在同相环流,但是环流不影响负载的相电流特性,同时对于本文的补偿方法,环流的存在并不影响补偿电流的计算结果,因此可以认为等效角接三相负载的环流为 0,得到三相相间负载线电流:

$$\begin{bmatrix} i_{lab} \\ i_{lbc} \\ i_{lca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (17)$$

由此得到的电流中包含负载的有功、无功分量,也包含谐波分量,为应用本文提出的平衡补偿算法,需对电流中的有功分量进行提取。采用积分运算可以有效消除负载电流中谐波分量的影响,同时平抑负荷的快速波动,本文采用积分运算进行分相有功电流提取:

$$\begin{aligned} i_{Rab} &= u_{ab} \cdot \frac{1}{U_{abms}^2} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T u_{ab} i_{lab} dt \\ i_{Rbc} &= u_{bc} \cdot \frac{1}{U_{bcms}^2} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T u_{bc} i_{lbc} dt \\ i_{Rca} &= u_{ca} \cdot \frac{1}{U_{camms}^2} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T u_{ca} i_{lca} dt \end{aligned} \quad (18)$$

其中, T 为基波周期。负载电流中剩余部分 i_{Qab} 、 i_{Qbc} 、 i_{Qca} 即为无功及谐波成分,可以作为无功及谐波补偿电流指令。

(3)不平衡补偿指令电流计算。

i_{Rab} 、 i_{Rbc} 、 i_{Rca} 分别对应三相相间有功电流分量。根据第 3 节提出的平衡补偿方法,对 3 个有功线电流可以以单位功率因数或正序对称作为补偿目标,分别计算补偿所需的无功电流,三者合成得到补偿指令 i_{rab} 、 i_{rbc} 、 i_{rca} ,三角接 STATCOM 根据无功补偿指令可以对负荷不平衡进行有效补偿。

由图 5 中所示不平衡补偿控制系统分析其动态性能可知,本文提出的非理想电压平衡补偿控制方法是开环系统,由系统电压及负载电流直接计算补偿电流指令,消除了闭环控制系统可能出现的稳定性问题并极大地提高了系统响应速度。控制过程中的主要延迟来自于系统三相电压锁相和负载有功电流分量提取,延迟时间小于 10 ms,满足大部分系统补偿应用情况。

5 仿真验证及实验

基于 PSCAD/EMTDC 仿真对本文提出的补偿方案进行验证。非理想系统电压源电压矢量(单位 kV)为 $U_{ab}=14.14e^{j0^\circ}$ 、 $U_{bc}=10.64e^{-j115^\circ}$ 、 $U_{ca}=13.64e^{j135^\circ}$,由此可得系统三相相电压分别为 $U_a=8.55e^{-j22.1^\circ}$ 、 $U_b=7.01e^{-j152.6^\circ}$ 、 $U_c=6.65e^{-j104.9^\circ}$,如图 6 所示。其中,正序线电压幅值 8.96 kV,负序线电压幅值 1.50 kV,三相

不平衡。

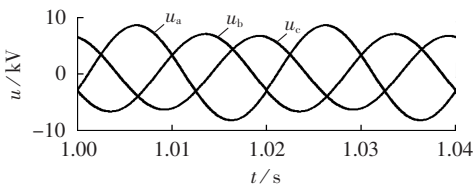


图 6 非理想系统三相相电压波形
Fig.6 Phase voltage waveforms of nonideal three-phase system

5.1 单相负荷平衡补偿

考虑单相负载,ab 相间接入负荷,bc、ca 相间开路,三相负载电流矢量(单位 kA)为 $I_a=14.14e^{j0^\circ}$ 、 $I_b=14.14e^{j180^\circ}$ 、 $I_c=0$,如图 7 所示。

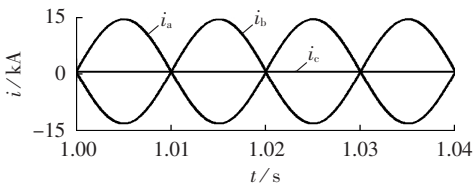


图 7 单相负荷相电流波形
Fig.7 Phase current waveforms of single-phase load

针对此非理想电压系统及负载情况,根据本文提出的单位功率因数补偿理论,由式(7)和式(14)可以分别计算得到补偿电流指令如表 1、2 所示。

表 1 单位功率因数补偿电流指令(有效值)

Table 1 Reference currents(RMS) of unity power factor compensation		
名称	数值/kA	无功类型(发出)
I_{rab}	0.052	容性
I_{rbc}	0.522	容性
I_{rca}	0.462	感性

表 2 正序对称补偿电流指令(有效值)

Table 2 Reference currents(RMS) of symmetrical positive-sequence compensation		
名称	数值/kA	无功类型(发出)
I_{rab}	0.176	容性
I_{rbc}	0.560	容性
I_{rca}	0.560	感性

单位功率因数补偿后,系统相电压电流波形如图 8 所示,与图 6 和图 7 相比可以看到三相相电压电压分别同相,三相电流的有效值分别为 0.727 kA、0.593 kA、0.567 kA。正序对称补偿后系统相电流波形及其与相电压相位关系分别如图 9、图 10 所示,可以看到,补偿后三相电流幅值均为 0.64 kA 且相角互差 120°,但各相电压与电流不再是同相位,由此可见本文提出的平衡补偿在单相负载补偿中有效。

5.2 三相负荷平衡补偿

考虑与 5.1 节相同的系统电压情况,在 ab、bc、

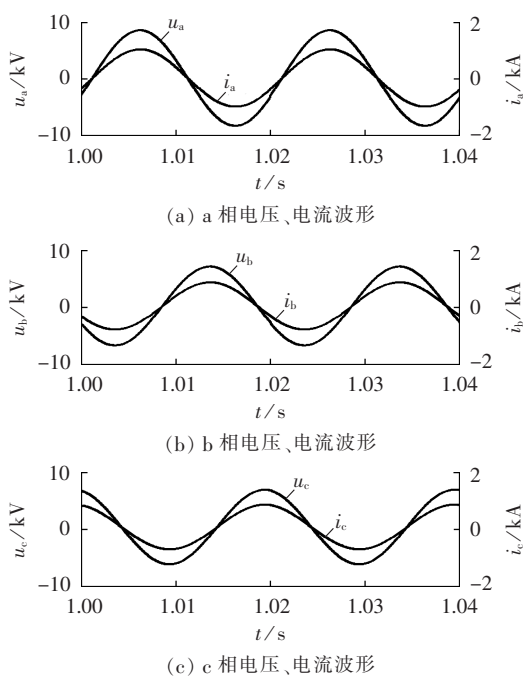


图 8 单位功率因数补偿波形

Fig.8 Waveforms of unity power factor compensation

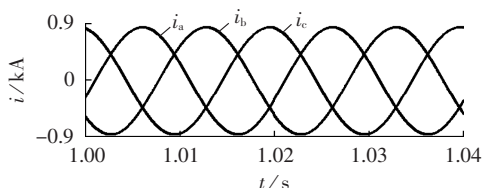


图 9 正序对称补偿后系统三相相电流波形

Fig.9 Phase current waveforms after symmetrical positive-sequence compensation

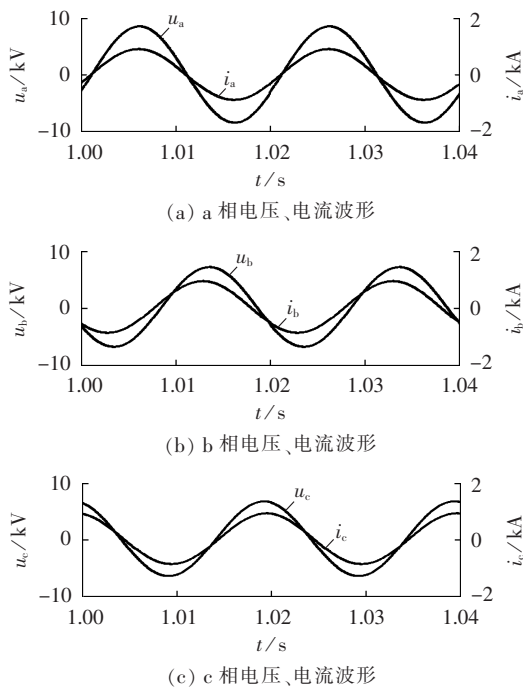


图 10 正序对称补偿后相电压、电流波形

Fig.10 Phase voltage and current waveforms after symmetrical positive-sequence compensation

ca 相间分别接入不同负荷,三相负载电流矢量(单位 kA)为 $I_{la}=0.685e^{-j28^\circ}$ 、 $I_{lb}=0.700e^{-j136.5^\circ}$ 、 $I_{lc}=0.809e^{j96.84^\circ}$,如图 11 所示。

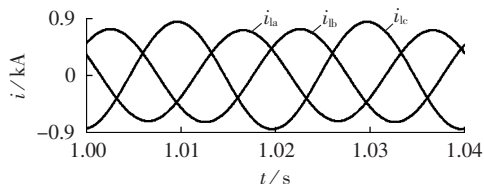


图 11 三相不平衡负载电流波形

Fig.11 Current waveforms of unbalanced three-phase load

针对此非理想电压系统及负载情况,根据本文提出的单位功率因数补偿理论,由式(7)和式(14)可以分别计算得到补偿电流指令如表 3、4 所示,其中正值代表发出容性无功,负值代表发出感性无功。

表 3 单位功率因数补偿电流指令(有效值)

Table 3 Reference currents(RMS) of unity power factor compensation

名称	数值/kA			
	补偿 ab 相间 负载	补偿 bc 相间 负载	补偿 ca 相间 负载	总补偿 电流
I_{rab}	0.012	-0.269	0.159	-0.098
I_{rbc}	0.105	0.008	-0.179	-0.066
I_{rca}	-0.093	0.270	-0.025	0.152

表 4 正序对称补偿电流指令(有效值)

Table 4 Reference currents(RMS) of symmetrical positive-sequence compensation

名称	数值/kA			
	补偿 ab 相间 负载	补偿 bc 相间 负载	补偿 ca 相间 负载	总补偿 电流
I_{rab}	0.037	-0.238	0.185	-0.016
I_{rbc}	0.112	0.012	-0.185	-0.061
I_{rca}	-0.112	0.238	-0.070	0.056

单位功率因数补偿后,系统三相电压、电流波形如图 12 所示,三角接 STATCOM 补偿电压、电流波形如图 13 所示,经过纯无功补偿,系统三相相电流、电压分别同相位,功率因数为 1。正序对称补偿后,系统三相电压、电流波形如图 14 所示,三角接 STATCOM 补偿电压、电流波形如图 15 所示,可见补偿后三相电流幅值均为 0.508 kA 且呈正序,相角互差 120° 。因此由单相负载和三相不平衡负载 2 种情

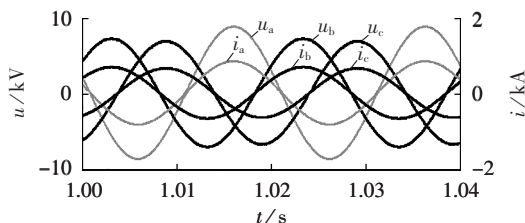


图 12 三相单位功率因数补偿相电压、电流波形

Fig.12 Phase voltage and current waveforms of three-phase unity power factor compensation

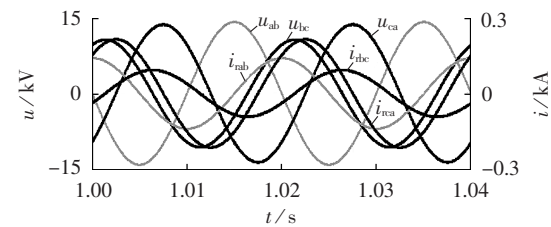


图 13 三相单位功率因数补偿补偿电压、电流波形
Fig.13 Compensation voltage and current waveforms of three-phase unity power factor compensation

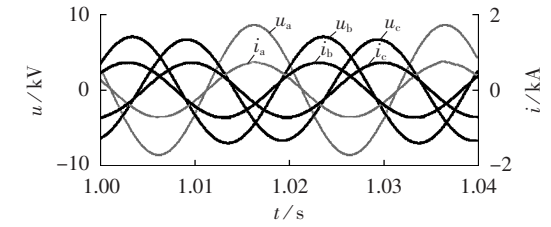


图 14 三相正序对称补偿相电压、电流波形
Fig.14 Phase voltage and current waveforms of three-phase symmetrical positive-sequence compensation

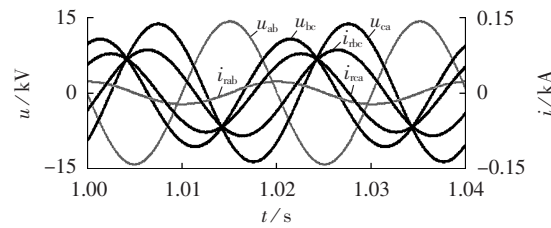


图 15 三相正序对称补偿补偿电压、电流波形
Fig.15 Compensation voltage and current waveforms of three-phase symmetrical positive-sequence compensation

况的补偿结果可以验证本文提出理论的正确性。

5.3 现场试验

将本文提出的非理想电压下不平衡负载补偿理论用于某钢厂 110 t 大型交流电弧炉电能质量治理。现场电网系统及三角接直挂 STATCOM 一次接线如图 16 所示。装置参数如下:电网电压为 35 kV, 变压器容量为 130 MV·A,三角接 STATCOM 容量为

± 40 Mvar,固定电容补偿容量为 40 Mvar,连接电抗为 $15\text{ mH}\times 2$,级联连接数为 36×3 相。现场实测波形如图 17—19 所示。

电弧炉冶炼过程中负荷波动剧烈,三相显著不

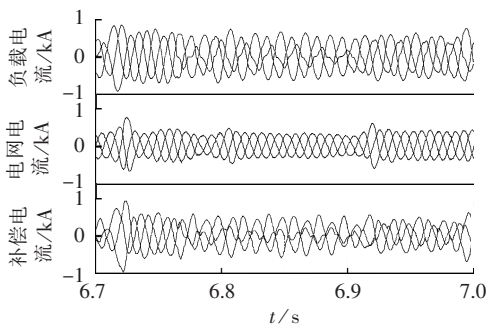


图 17 不平衡补偿三相电流波形
Fig.17 Three-phase current waveforms of unbalanced load compensation

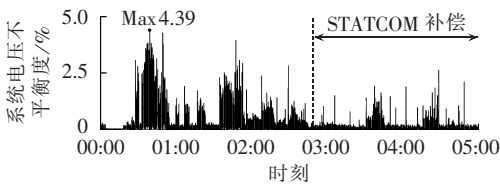


图 18 系统电压不平衡度
Fig.18 System voltage imbalance degree

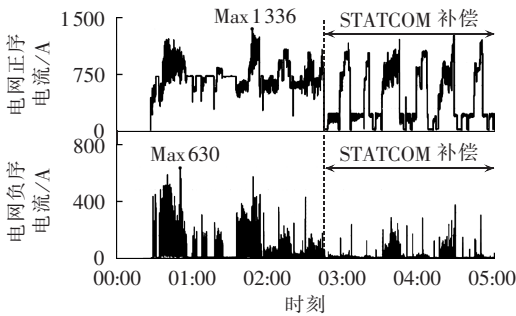


图 19 补偿前后系统正负序电流含量
Fig.19 Positive- and negative-sequence currents, before and after compensation

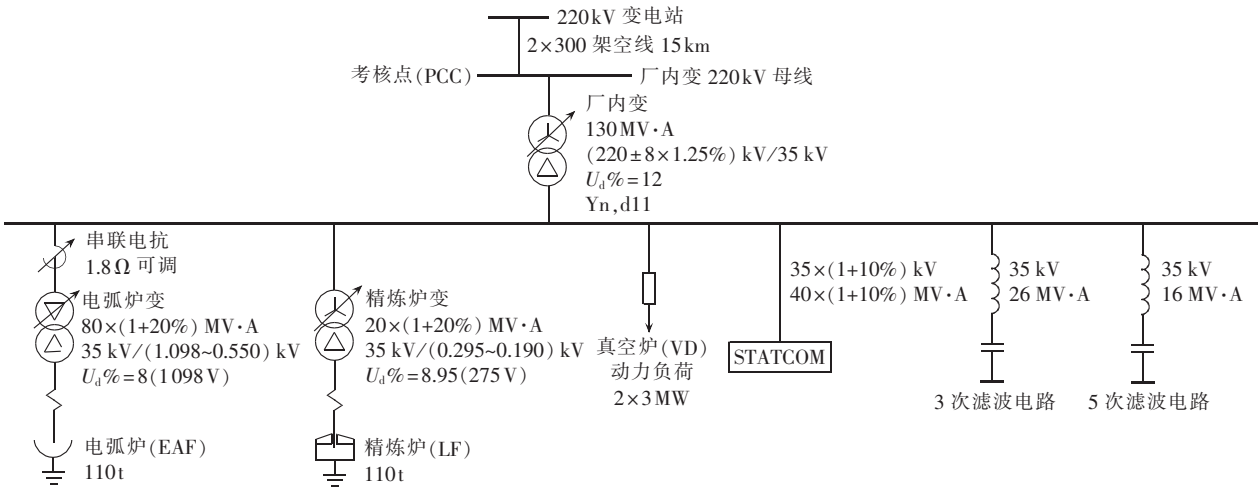


图 16 电弧炉不平衡补偿系统接线图
Fig.16 Wiring diagram of unbalanced load compensation system for electric arc furnace

平衡,如图 18 所示系统电压不平衡度达到 5% 左右。系统电压不平衡主要由不平衡负荷导致,投入补偿后系统电压不平衡度有所降低,但依然在 2% 左右,在补偿计算中需要进行考虑。不平衡补偿前后系统电流正、负序分量含量如图 19 所示,可以看到,在补偿投入后系统电流中的负序分量显著减少,有效抑制三相不平衡。瞬时电流波形如图 17 所示,可以看到负荷显著不平衡且有较快变化,经补偿后系统电流达到平衡,进一步验证本文提出方法的有效性。

6 结论

本文在 Steinmetz 电纳平衡补偿理论基础上讨论了系统电压非理想情况下不平衡负载的补偿问题,得到以下结论。

a. 相对于 Steinmetz 电纳平衡理论,本文提出的补偿方法增加了一个自由度,即在三相相间分别注入无功补偿电流,实现了非理想电压下不对称负载的补偿。

b. 非理想电压情况下通过纯无功补偿可以将任意不对称负载补偿为单位功率因数负载或正序对称负载形式,针对这 2 种补偿方案本文给出详细的理论推导及补偿电流指令的计算方法。

c. 当系统电压为理想电压时,本文提出单位功率因数补偿和正序对称补偿方案均退化为 Steinmetz 电纳平衡理论,因此可以认为本文提出的补偿理论是对 Steinmetz 电纳平衡理论的扩展。

d. 本文给出了三角接 STATCOM 进行不对称补偿的实施方法,并通过仿真及实验进行有效验证。在电力系统中非理想电压情况是普遍存在的,采用本文提出的补偿方法可以对不对称负载进行有效治理,对提高电能质量和保证系统安全具有很大的意义。

参考文献:

- [1] 许树楷,宋强,刘文华,等. 配电系统大功率交流电弧炉电能质量问题及方案治理研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(19):93-98.
XU Shukai, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Research on the power quality problems and compensation scheme for electric arc furnace in distribution supply system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 93-98.
- [2] 赵伟,罗安,曹一家,等. 三相-两相牵引变电所用无功动态补偿与谐波治理混合系统的研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(28):107-114.
ZHAO Wei, LUO An, CAO Yijia, et al. Hybrid var and harmonic dynamic compensator and application to three-two phase traction substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 107-114.
- [3] 张定华,桂卫华,王卫安,等. 大型电弧炉无功补偿与谐波抑制的综合补偿系统[J]. 电网技术,2008,32(12):23-29.

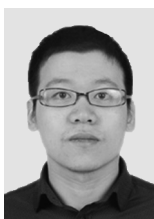
- ZHANG Dinghua, GUI Weihua, WANG Weian, et al. Comprehensive compensation system combining reactive power compensation and harmonic suppression for large-scale electric arc-furnace [J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 23-29.
- [4] GUILLE A E. Reactive power control in electric systems[J]. IEE Review, 1983, 29(4): 347.
- [5] OTTO R A, PUTMAN T H, GYUGYI L. Principles and applications of static, thyristor-controlled shunt compensators [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1978, PAS-97(5): 1935-1945.
- [6] WANG J, FU C, ZHANG Y. SVC control system based on instantaneous reactive power theory and fuzzy PID [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(4): 1658-1665.
- [7] TUNG N X, FUJITA G, HORIKOSHI K. Phase loading balancing by shunt passive compensator [C] // Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia & Pacific. Seoul, Korea: IEEE, 2009: 1-4.
- [8] 林建熙,袁志昌,杨银国,等. 提高链式 STATCOM 非对称故障运行能力的控制方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 108-115.
LIN Jianxi, YUAN Zhichang, YANG Yinguo, et al. Cascaded STATCOM control to enhance its operating performance in asymmetrical fault condition [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 108-115.
- [9] 刘锦宁,刘洋,何伟斌. ± 200 Mvar 静止同步补偿器的电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 29-35.
LIU Jinning, LIU Yang, HE Weibin. Grid voltage control of ± 200 Mvar STATCOM [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 29-35.
- [10] 谭树龙,杨耕,耿华. 不平衡工况下链式 STATCOM 的运行极限分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 44-49.
TAN Shulong, YANG Geng, GENG Hua. Analysis of operating limit for cascaded STATCOM in unbalanced condition [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 44-49.
- [11] 周建丰,顾亚琴,韦寿祺. SVC 与 STATCOM 的综合比较分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 57-60.
ZHOU Jianfeng, GU Yaqin, WEI Shouqi. Comprehensive comparative analysis of SVC and STATCOM [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(12): 57-60.
- [12] 韩学军,王晶浩,潘超,等. 综合补偿三相不平衡负载的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊 2): 288-291.
HAN Xuejun, WANG Jinghao, PAN Chao, et al. Research on integrated compensation of three phase unbalance load [J]. Power System Technology, 2006, 30(Supplement 2): 288-291.
- [13] SONG Qiang, LIU Wenhua. Control of a cascade STATCOM with star configuration under unbalanced conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(1): 45-58.
- [14] SUMMERS T J, BETZ R E, MIRZAEVA G. Phase leg voltage balancing of a cascaded H-bridge converter based STATCOM using zero sequence injection [C] // European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 1-10.
- [15] LIU W, ZHAO X, SONG Q, et al. Research on unbalance load compensation by cascaded STATCOM with star configuration [C] // IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, DC, Canada: IEEE, 2012: 734-738.
- [16] 赵香花,陈远华,刘文华,等. 一种星接链式 STATCOM 不平衡

- 补偿的新拓扑[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):108-113.
- ZHAO Xianghua, CHEN Yuanhua, LIU Wenhua, et al. New topology for unbalance compensation of cascaded STATCOM with star configuration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 108-113.
- [17] 夏正龙, 史丽萍, 杨晓冬, 等. 一种改进的电网电压不平衡环境下链式 STATCOM 控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1310-1316.
- XIA Zhenglong, SHI Liping, YANG Xiaodong, et al. An improved control strategy for cascaded STATCOM under supply voltage imbalance[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1310-1316.
- [18] PENG F Z, WANG J. A universal STATCOM with delta-connected cascade multilevel inverter[C]//2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. [S.l.]: IEEE, 2004: 3529-3533.
- [19] DU S, LIU J, LIN J, et al. Control strategy study of STATCOM based on cascaded PWM H-bridge converter with delta configuration[C]//Power Electronics and Motion Control Conference. Harbin, China: IEEE, 2012: 345-350.
- [20] PENG F Z, LAI J S. Dynamic performance and control of a static var generator using cascade multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(3): 748-755.
- [21] 胡应宏, 王建勋, 任佳佳, 等. 不平衡负载的平衡分量法分解及补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 98-104.
- HU Yinghong, WANG Jianze, REN Jiajia, et al. Balance

component decomposition and compensation method for unbalanced load[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 98-104.

- [22] 刘钊, 刘邦银, 段善旭, 等. 系统电压不平衡下链式静止同步补偿器控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 1-7.
- LIU Zhao, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Research on cascade multilevel STATCOM under unbalanced system voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 1-7.
- [23] 梅红明, 刘建政. 角接链式 STATCOM 的环流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6398-6406.
- MEI Hongming, LIU Jianzheng. Circulating current control of the delta-connected cascaded STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6398-6406.

作者简介:



王 一

王 一(1987—),男,黑龙江鸡西人,博士研究生,主要从事电能质量治理、柔性输配电技术方面的研究工作(E-mail: wangyixiaopang@163.com);

刘建政(1961—),男,北京人,副教授,主要从事电力电子变流器技术、柔性输配电技术方面的研究工作。

Balanced compensation for unbalanced load in condition of asymmetrical voltage

WANG Yi, LIU Jianzheng

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The method for compensating the unbalanced load in condition of asymmetrical power system voltage is studied. It is pointed out that, the Steinmetz balanced component compensation method cannot realize the balanced compensation for the unbalanced three-phase load current in the condition of nonideal system voltage. A degree of freedom for reactive power compensation is added to the ideal Steinmetz compensation theory and a method for calculating the compensating admittance is proposed, which converts the three-phase load current compensation into the unity power factor compensation and the positive-sequence current compensation in the condition of asymmetrical system voltage. A system control scheme of STATCOM in delta-connection mode is given for the unbalanced load compensation in condition of arbitrary system voltage. The effectiveness of the proposed method is verified by PSCAD/EMTDC simulation and site test.

Key words: nonideal system voltage; unbalanced load; unity power factor compensation; positive-sequence compensation