

不平衡电流无功补偿方法的研究

谢连富, 单铁铭

(北京电力房山供电公司, 北京 102401)

摘要: 电网中不对称负荷普遍存在, 对系统影响很大。首先对几种一般情况进行分析, 分别考虑了系统存在负序分量和零序分量时的情况。然后通过叠加原理, 采用 Y 和 两种接线方式组合, 根据电力系统实际情况, 得出三相不平衡负载平衡化补偿的实用模型。该模型既适合于三相三线制, 也适合于三相四线制接线方式, 达到有功电流平衡。最后通过仿真实验和现场实验数据验证理论推导的正确性。

关键词: 不平衡负载; 三相四线制; 负荷补偿; 叠加原理

中图分类号: TM714.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)09-0076-04

0 引言

电力系统正常性的不对称是由于系统三相元件或负荷不对称所致, 由此产生的不平衡电流对系统影响很大^[1,2]: 增加线路损耗; 增加配电变压器有功损耗; 降低配电变压器出力; 造成三相电压不对称; 影响电动机输出功率, 使绕组温度升高^[3]。

除上述影响外, 由三相不平衡电流分解出来的负序和零序分量会对计量仪表的精度产生影响。

目前绝大多数不对称补偿方面的研究是针对三相三线制系统展开的^[4], 通常只考虑到系统存在负序分量的情况。只有少数学者对含有零序分量系统的不对称补偿进行了研究^[4,5]。

本文研究了既适合三相三线制接线形式又适合三相四线制接线形式的不平衡负荷无功补偿方法, 并建立模型, 利用该模型, 在只知补偿前各相有功和无功功率的情况下, 即可确定需要补偿的容量。同时结合无功补偿尽量只使用电容, 而尽量不使用电感的实际情况, 对上述方法进行了改进。

1 平衡补偿一般理论公式的推导

首先假设补偿线电流和电压可测。三相电流不对称, 存在负序和零序分量。补偿前后电源电压均对称。补偿后各相功率因数为 1, 三相电流平衡, 不含有负、零序分量。

1.1 不对称负荷为 接法

设补偿系统如图 1 所示。

由文献 [3] 可知:

$$\begin{cases} B_{ab} = -B_{ab}^L + \frac{\sqrt{3}}{3}(G_{ac}^L - G_{bc}^L) \\ B_{bc} = -B_{bc}^L + \frac{\sqrt{3}}{3}(G_{ab}^L - G_{ac}^L) \\ B_{ac} = -B_{ac}^L + \frac{\sqrt{3}}{3}(G_{bc}^L - G_{ab}^L) \end{cases} \quad (1)$$

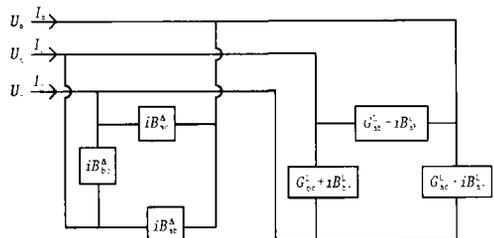


图 1 不对称负荷 接法补偿情况

Fig 1 Unbalanced three-phase three-wire distribution system with available compensator

式 (1) 只能作为补偿原理的说明, 因为要求的补偿器的电纳是用负荷导纳来表示的, 而在此种接线方式中, 负荷的导纳却不象有功和无功那么容易测量。下面给出由有功和无功表示的形式。

将公式 (1) 两端同时乘以 U^2 , 变成如下形式:

$$\begin{cases} Q_{ab} = -Q_{ab}^L + \frac{\sqrt{3}}{3}(P_{ac}^L - P_{bc}^L) \\ Q_{bc} = -Q_{bc}^L + \frac{\sqrt{3}}{3}(P_{ab}^L - P_{ac}^L) \\ Q_{ca} = -Q_{ca}^L + \frac{\sqrt{3}}{3}(P_{bc}^L - P_{ab}^L) \end{cases} \quad (2)$$

这就是不对称负荷为 接法时, 用补偿前负荷有功功率和无功功率表示的负荷补偿模型, 可见对于不对称负荷为 接法时, 只需对相间进行补偿一

定量电容或电感即可。按照本文所规定的参考方向,负号表示需补偿电感,正号表示需要补偿电容(以下同)。

1.2 不对称负荷为 Y 接法

系统如图 2 所示,补偿前负荷情况分别为: $G_a^L + B_a^L$, $G_b^L + B_b^L$ 和 $G_c^L + B_c^L$ 。

由文献 [3] 可知:

$$\begin{cases} B_{ab} = \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_a^L - G_b^L) \\ B_{bc} = \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_b^L - G_c^L) \\ B_{ac} = \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_c^L - G_a^L) \\ B_a^Y = \frac{1}{\sqrt{3}} (G_b^L - G_c^L) - B_a^L \\ B_b^Y = \frac{1}{\sqrt{3}} (G_c^L - G_a^L) - B_b^L \\ B_c^Y = \frac{1}{\sqrt{3}} (G_a^L - G_b^L) - B_c^L \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} B_{ab} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \left(\frac{I_a}{U_a} \cos \alpha_a - \frac{I_b}{U_b} \cos \alpha_b \right) = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{P_a}{U_a^2} - \frac{P_b}{U_b^2} \right) \\ B_{bc} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \left(\frac{I_b}{U_b} \cos \alpha_b - \frac{I_c}{U_c} \cos \alpha_c \right) = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{P_b}{U_b^2} - \frac{P_c}{U_c^2} \right) \\ B_{ac} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \left(\frac{I_c}{U_c} \cos \alpha_c - \frac{I_a}{U_a} \cos \alpha_a \right) = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{P_c}{U_c^2} - \frac{P_a}{U_a^2} \right) \\ B_a^Y = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{I_b}{U_b} \cos \alpha_b - \frac{I_c}{U_c} \cos \alpha_c \right) + \frac{I_a}{U_a} \sin \alpha_a = \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{P_b}{U_b^2} - \frac{P_c}{U_c^2} \right) + \frac{Q_a}{U_a^2} \\ B_b^Y = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{I_c}{U_c} \cos \alpha_c - \frac{I_a}{U_a} \cos \alpha_a \right) + \frac{I_b}{U_b} \sin \alpha_b = \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{P_c}{U_c^2} - \frac{P_a}{U_a^2} \right) + \frac{Q_b}{U_b^2} \\ B_c^Y = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{I_a}{U_a} \cos \alpha_a - \frac{I_b}{U_b} \cos \alpha_b \right) + \frac{I_c}{U_c} \sin \alpha_c = \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{P_a}{U_a^2} - \frac{P_b}{U_b^2} \right) + \frac{Q_c}{U_c^2} \end{cases} \quad (4)$$

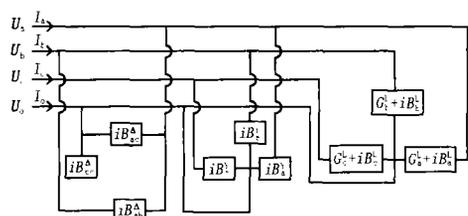


图 2 不对称负荷 Y 接法补偿情况

Fig 2 Unbalanced three-phase four-wire distribution system with available compensator

式 (3) 也只能作为补偿原理的说明,下面给出由有功、无功表示补偿形式。

设补偿前各相电流电压分别为: U_a 、 U_b 、 U_c 和 I_a 、 I_b 、 I_c ; 各项功率因数分别为: $\cos \alpha_a$ 、 $\cos \alpha_b$ 和 $\cos \alpha_c$, 将式 (3) 变形, 就可以得到基于有功功率和无功功率表示的补偿模型形式。如下式 (4):

式 (4) 即为三相四线情况下, 不平衡负荷的补偿模型, 可见对于不对称负荷为 Y 接线形式, 不但要对相间进行补偿, 相对地之间也要进行补偿。

通过上面的讨论可知, 无论系统在哪种接线形式下, 只要知道了负荷的有功功率和无功功率, 就可以通过式 (2) 和式 (4) 确定最终要补偿的模型形式。

2 改进的补偿方法

由式 (2) 和 (4) 可知, 在知道系统有功和无功情况下, 就可确定补偿容量的大小。但在补偿的设备中, 既有电容, 又有电感, 实际中, 若安装大量电感的话, 是件非常麻烦的事情, 电感又重又大, 成本很高, 而且损耗也较大。为此, 本文对上述方法进行了改进。

设系统的各项的有功功率和无功功率分别为: P_a 、 P_b 、 P_c 和 Q_a 、 Q_b 、 Q_c 。将实际的系统看成一个“黑盒子”, 认为其由 Y 接线形式和 Y 接线形式组合而成, 且其有功功率和无功功率由两部分联合产生的, 但各自的实际比例不确定。

由于实际负荷大部分为感性负荷, 这样分解的目的就在于为了充分利用负荷自身的感性无功, 而在补偿时, 只需要补偿电容器。如图 3 所示。

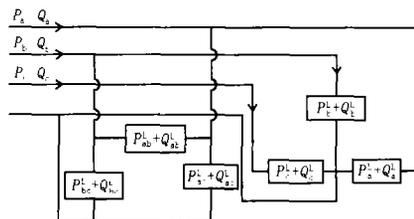


图 3 实际系统电路图

Fig 3 A real distribution system

现假定 接线部分有功、无功为：

$$\begin{cases} P'_{ab} = P'_{bc} = P'_{ac} = P_x \\ Q^L_{ab} = Q^L_{bc} = Q^L_{ac} = Q_x \end{cases} \quad (5)$$

由此可知 Y接线部分有功、无功。如式 (6)：

$$\begin{cases} P'_a = P_a - P'_{ab} = P_a - P_x \\ P'_b = P_b - P'_{bc} = P_b - P_x \\ P'_c = P_c - P'_{ac} = P_c - P_x \\ Q^L_a = Q_a - Q^L_{ab} = Q_a - Q_x \\ Q^L_b = Q_b - Q^L_{bc} = Q_b - Q_x \\ Q^L_c = Q_c - Q^L_{ac} = Q_c - Q_x \end{cases} \quad (6)$$

将式 (5)和式 (6)分别代入公式 (2)和 (4)得到

接线部分和 Y接线部分各自的补偿模型,进而可得到最终的补偿模型：

$$\begin{cases} Q_{ab} = \frac{2}{\sqrt{3}} (P_a - P_b) - Q_x \\ Q_{bc} = \frac{2}{\sqrt{3}} (P_b - P_c) - Q_x \\ Q_{ac} = \frac{2}{\sqrt{3}} (P_a - P_c) - Q_x \\ Q^Y_a = [\frac{1}{\sqrt{3}} (P_b - P_c) - Q_a] + Q_x \\ Q^Y_b = [\frac{1}{\sqrt{3}} (P_c - P_a) - Q_b] + Q_x \\ Q^Y_c = [\frac{1}{\sqrt{3}} (P_a - P_b) - Q_c] + Q_x \end{cases} \quad (7)$$

从式 (7)可见:负荷 接线部分有功 P_x 对最终模型没有影响,模型中只包含未知数 Q_x 。

不平衡无功补偿的原则是：

(1)只补偿电容;(2)尽量使三相功率因数接近 1,三相有功电流平衡;(3)在满足上个条件基础上,尽量减小电容的使用数量。

这样,可以通过调节 Q_x 的取值,使补偿无论在效果上,还是在电容器配置上都是最优。

3 仿真研究及现场实际数据验证

在理论推导的基础上,本文又使用 PSCAD/EMTDC软件,分别对上面分析进行了仿真实验。设某系统功率因数很低且三相严重不平衡;补偿前：

$P_a = 22 \text{ kW}$, $Q_a = -21 \text{ kVar}$; $P_b = 33 \text{ kW}$, $Q_b = -32 \text{ kVar}$; $P_c = 44 \text{ kW}$, $Q_c = -43 \text{ kVar}$ 。补偿前电流及各相功率因数为：

I_a	I_b	I_c	$\cos \alpha_a$	$\cos \alpha_b$	$\cos \alpha_c$	I_0
553	376	468	0.523	0.430	0.81	135

代入公式 (8),取 $Q_x = -15 \text{ kVar}$,得最终补偿结果： $Q_{ab} = 3 \text{ kVar}$, $Q_{bc} = 3 \text{ kVar}$, $Q_{ac} = 41 \text{ kVar}$, $Q_{bn} = 30 \text{ kVar}$, $Q_{cn} = 22 \text{ kVar}$ 。补偿后电流和各相功率因数为：

I_a	I_b	I_c	$\cos \alpha_a$	$\cos \alpha_b$	$\cos \alpha_c$	I_0
256	255	257	0.99	0.99	0.99	0.1

补偿前后电流情况如图 4~7所示：

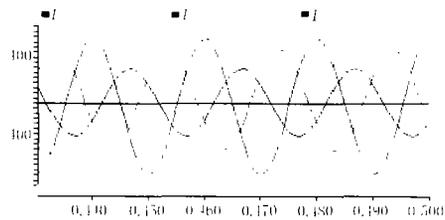


图 4 补偿前电流整体情况

Fig 4 Unbalanced currents before compensation

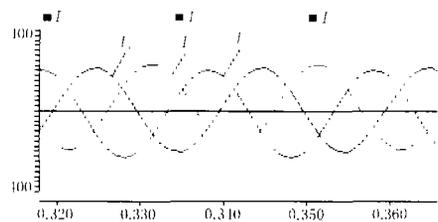


图 5 补偿后电流整体情况

Fig 5 Unbalanced currents after compensation

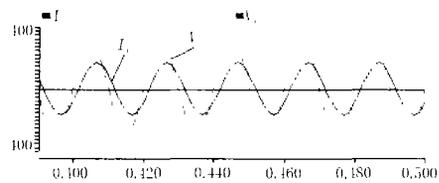


图 6 补偿前电流电压情况 (以 A相为例)

Fig 6 Unbalanced voltage (U_a) before compensation

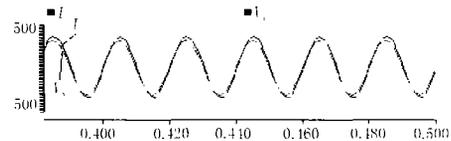


图 7 补偿后电流电压情况 (以 A相为例)

Fig 7 Unbalanced voltage (U_a) after compensation

从以上仿真结果可以看出,本文提出的模型,对解决不平衡问题有很好的作用。

本文同时对石家庄市某变电站某时刻现场实际数据进行验证,补偿前电流和各相功率因数为：

I_a	I_b	I_c	$\cos \alpha_a$	$\cos \alpha_b$	$\cos \alpha_c$	I_0
279	226	130	0.71	0.71	0.71	127

通过补偿后,各相电流和功率因数为：

I_a	I_b	I_c	$\cos \alpha$	$\cos \beta$	$\cos \gamma$	I_0
149	150	150	0.997	0.998	0.997	0.6

实验结果与理论推导完全相符,证明了理论推导的正确性,同时证明本文提出的方法对不平衡电流无功补偿方面具有显著的作用。

4 结论

针对当前的不平衡补偿大都只考虑负序电流,而不考虑零序的实际情况,应用叠加原理,得出既适合于三相三线制,也适合于三相四线制不对称负荷的补偿方式。通过 Y 接线和 接线两种补偿形式共同作用,对各相提供不同数量的无功,消除不对称负荷产生的负序和零序电流分量,使系统从母线侧来看是对称的。同时功率因数理论上提高到 1,线路上的能量损失也减少。仿真实验和现场实践结果均表明在功率因数比较低的情况下,应用本文所提出的方法可以完全补偿不平衡;在功率因数较高的情况下,可以改善不平衡。

参考文献:

- [1] 雷惠博. 三相电量对称性对无功功率变送器测量误差的影响 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(8): 26-29.
LEI Hui-bo The Influence of Three-phase Electric Con-

sumption Measures to the Reactive Power Changer [J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(8): 26-29.

- [2] Miller E J E 电力系统无功功率控制 [M]. 胡国根, 译. 北京: 水利电力出版社, 1990.
Miller E J E Reactive Power Control in Electric Systems [M]. HU Guo-gen, Trans Beijing Hydraulic and Electric Power Press, 1990.
- [3] 单铁铭, 杨仁刚. 不平衡电流无功补偿方法的研究 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 26-29.
SHAN Tie-ming, YANG Ren-gang Reactive Power Compensation for Unbalanced Current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 26-29.
- [4] Lee San-yi On-line Reactive Power Compensation Schemes for Unbalanced Three Phase Four Wire Distribution Feeders [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993 18(4): 1928-1965.

收稿日期: 2005-10-12; 修回日期: 2005-12-19

作者简介:

谢连富 (1968 -), 男, 本科, 工程师, 主要从事电网的运行与管理工作;

单铁铭 (1976 -), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事电力系统及其自动化工作。E-mail: shanm@163.com

Research on unbalanced reactive current compensation method

XIE Lian-fu, SHAN Tie-ming

(Fangshan Power Supply Corporation of Beijing Power, Beijing 102401, China)

Abstract: A new reactive power compensation method is developed to reduce the negative and zero sequence components of unbalanced load currents. This method can be employed not only in three-phase three-wire system but also in three-phase four-wire distribution feeders. Unbalanced load current may result in additional losses and damage to power systems. Load compensation is an effective method to eliminate those undesired sequence currents. The compensation uses a Y-connected and -connected static reactive power compensator to give a different amount of reactive power compensation to each phase. Digital simulations are made to Y-connected and -connected load.

Key words: unbalanced load current; three-phase four-wire; load compensation; superposition theorem

(上接第 56 页 continued from page 56)

Abstract: With programming technique of object-oriented, this paper abstracts a object-oriented model of CDT communication protocol. A template file is designed to store CDT protocol's parameter. According to format of template file and real requirements, an instance file in practice can be produced, which can make CDT protocols coming from different companies adaptive to each other. A correct solution is worked out for incompatibility among IEDs in transformer substation to enhance the efficiency of installation and maintenance. With C++ programming, this paper points out its high efficient mechanism in CDT protocol.

Key words: CDT protocol; object-oriented technique; template; substation communication