第31卷 第10期
2003年10月15日

继电器
RELAY

Vol 31 No. 10
Oct 15, 2003

基于链式STATCOM的三相不平衡负载的平衡化补偿

罗承廉, 林烽, 刘遵义, 纪勇, 刘文华

(河南省电力调度通信中心, 河南 郑州 450000)

摘要: 链式STATCOM由于具有分相控制能力、输出无功电流谐波含量低、响应速度快等优点而适合于不平衡负荷的平衡化补偿。给出了采用链式STATCOM实现平衡化补偿的主电路结构及电压-无功综合控制方法。三相补偿电流相量采用对称分量法通过矢量变换获得, 单相无功功率采用单相瞬时无功功率算法得到, 链式逆变器采用特定谐波消除PWM算法(SHE-PWM)以保证输出无功电流的谐波总畸变率小于5%, 同时保证直流侧电容电压的稳定。对所给出的补偿方法进行了仿真研究, 结果验证了链式STATCOM进行快速平衡化补偿的能力。

关键词: 无功发生器; 不平衡负载; 平衡化补偿

中图分类号: TM714 3 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2003)10-0005-04

1 引言

在电网中, 存在着很多种类的三相不平衡负荷, 其电压、电流不平衡可能给系统中的用户带来多种危害[1]。为了减轻不平衡负荷对系统造成的危害, 出现了多种解决方案。其中比较常见的是使用SVC来进行分相电纳(无功)补偿[2]。SVC虽然具有成本较低, 响应速度也较快的优点, 但是它也具有几个严重的缺点:

(1) 含有较多的无源器件——电抗器或者电容器, 体积庞大。

(2) SVC本身产生低次谐波电流, 需要安装滤波器。

(3) SVC输出无功与系统电压的平方成正比, 系统电压下降较多时, 无法对系统提供足够的无功支持。

本文给出了一种新型的基于链式无功发生器的分相补偿不平衡负载的方法。这种方法可以对任何三相不接地不平衡负载进行平衡化补偿, 不平衡的有功功率及全部无功功率均可以被补偿, 使得经补偿后该负载对系统来说是一个平衡的有功负载。和SVC装置相比, 该装置有如下优点: ①采用无功发生器发出无功, 而不是靠电容、电抗补偿无功, 使得装置体积小, 重量轻; ②装置发出的无功电流谐波含量小, 电流谐波总畸变率(THD)小于5%, 不需对装置进行谐波滤波; ③装置具有很快的补偿速度, 无功发出响应时间小于30ms。该装置可以广泛应用于对三相380V至10kV的配电网上的不平衡负载进行平衡化补偿。

2 基于链式STATCOM的不平衡负载平衡化补偿的原理

任何三相不接地的不平衡负载, 都可以转换为等效的三相三角形接线。每相负载都可以通过与之并联合适的电容/电感来实现负荷的平衡化补偿。补偿并不改变供电电源与负载间的有功交换。SVC就是采用并联电容或电抗补偿不平衡负载的一种方法。同样, 链式无功发生器也可用于补偿不平衡负载。下面先介绍链式无功发生器的基本原理。

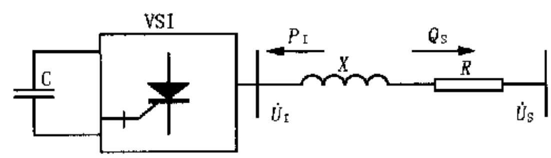

图1 链式STATCOM与系统的等效连接图

Fig. 1 Equivalent circuit of cascade inverter based STATCOM connecting with system

图1给出了链式无功发生器与供电电源系统的连接图, 其中U_s代表系统电压, U_I代表链式逆变器输出电压的基波分量。理想情况下(逆变器损耗为0), 只要控制逆变器输出电压大小, 就可以控制逆变器与系统交换无功的大小和方向, 因而也就可以应用于不平衡负荷补偿。

实际逆变器损耗并不为0, 稳态时有:

$$U_d = \frac{U_s}{K_m} \cdot \frac{\sin(\delta + \alpha)}{\sin \alpha} \tag{1}$$

$$Q_s = \frac{U_s^2}{2R} \sin 2\delta \tag{2}$$

式中, K_m为逆变器输出电压基波有效值与直流电

压之比(称为调制比), U_d 为直流电压, Q_s 为 STATCOM 输出到系统的无功功率, $\alpha=\arctan(X/R)$, δ 为 U_s 领先 U_1 的相角。

由式(1)、(2)可知, 只要同时控制 δ 角和 K_m, 就可以控制链式无功发生器与系统交换的无功功率的大小和方向, 且可以保持直流电容电压的稳定。

3　采用链式无功发生器的平衡化补偿主电路

如图 2 所示, 三相链式逆变器与连接电抗接成三角形, 每个单相桥的电容独立。每相链式逆变器由 N ($N=1,2,...$) 个单相电压型逆变桥输出端串联组成。基于链式逆变器的无功发生器有如下优点:

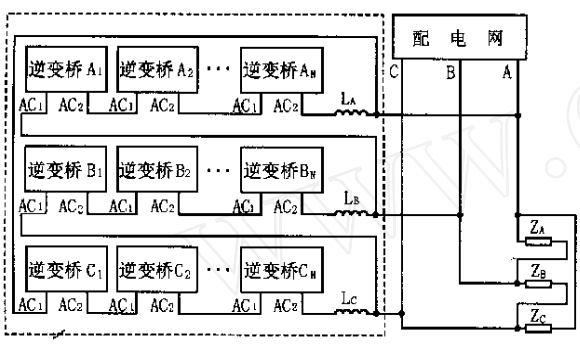

图 2　基于链式无功发生器的不平衡补偿装置主电路构成图

Fig. 2　Main circuit configuration of unbalance compensation based on cascade inverters

(1) 采用普通变压器或直接接入系统, 避免了多重化变压器, 减小了占地面积, 降低了装置成本;

(2) 可以实现分相控制, 实现不平衡补偿;

(3) 采用模块化结构, 便于扩展装置容量;

(4) 采用冗余功率模块, 提高了装置可靠性;

(5) 避免了多重化逆变变压器激磁回路中剩磁和饱和非线性导致的装置过电压和过电流。

4　控制算法及实现

为了控制无功发生器输出补偿所需要的无功功率, 就需要知道每相负载各自需要的无功功率补偿量。用负载线电流表示的每相需要补偿的电纳为

$$\begin{cases} B_{ab}^{(c)} = -\dfrac{1}{3U}[\mathrm{Im}\,I_a + \mathrm{Im}\,\alpha I_b - \mathrm{Im}\,\alpha^2 I_c] \\ B_{bc}^{(c)} = -\dfrac{1}{3U}[\mathrm{Im}\,\alpha I_b + \mathrm{Im}\,\alpha^2 I_c - \mathrm{Im}\,I_a] \\ B_{ca}^{(c)} = -\dfrac{1}{3U}[\mathrm{Im}\,\alpha^2 I_c + \mathrm{Im}\,I_a - \mathrm{Im}\,\alpha I_b] \end{cases} \tag{3}$$

而每相需要补偿的电流为:

$$\begin{cases} I_{ab} = Y_{ab}(1-\alpha^2)U \\ I_{bc} = Y_{bc}(\alpha^2-\alpha)U \\ I_{ca} = Y_{ca}(\alpha-1)U \end{cases} \tag{4}$$

通过对称分量法的矢量变换, 可得到除正序电流相量的实部(即有功分量)以外的电流分量(包括正序电流相量的虚部和负序电流相量), 作为由补偿装置提供的补偿电流。图 3 给出了对称分量法的矢量变换框图[4]。

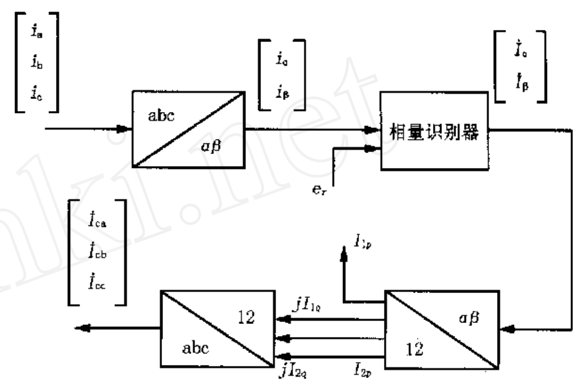

图 3　对称分量法的矢量变换框图

Fig. 3　Vector transform diagram with symmetrical component method

获得所需要的每相补偿电流后, 就可以构造出采用需补偿的无功功率作为反馈量的闭环控制框图。单相无功功率的测量采用单相瞬时无功功率求解方法以确保测量的快速性[5]。

图 4 给出了采用无功功率做反馈量的无功补偿控制算法框图。图中 I_{ref} 为需补偿的无功电流值。

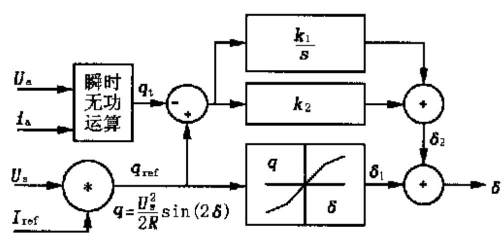

图 4　采用无功功率做反馈量的控制框图

Fig. 4　Diagram of control with reactive power feedback

在实际应用中, 除对负载进行平衡化补偿外, 还应对负载电压进行控制以保证其稳定, 因此应采用如图 5 所示的电压- 无功综合控制方法, 即采用给定电压与实际电压的差值作为部分无功给定值, 以兼顾电压稳定控制。图 5 中, U_s 为三相电压均方根值。

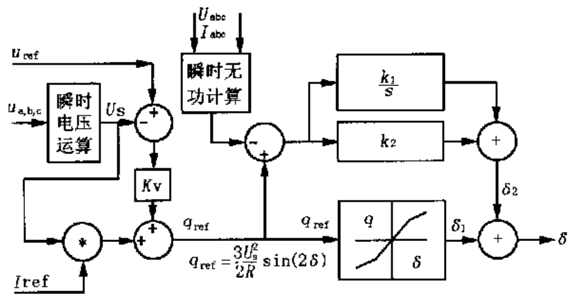

图 5　电压- 无功综合补偿控制框图

Fig. 5　Diagram of integrated voltage- reactive power compensation control

$$U_s=\frac{\sqrt{U_a^2+U_b^2+U_c^2}}{3} \tag{5}$$

由于三相直流电容独立, 因此可以采用脉冲幅度调制(PAM, 即只控制脉冲相位, 脉冲宽度固定)或脉宽调制(PWM, 既控制脉冲相位, 又控制脉冲宽度)为了在低开关频率下保证输出无功电流最小化, 应采用 SHE- PWM 调制[3]。

5　仿真研究

为了验证采用电压- 无功综合补偿控制的不平衡负载平衡化补偿效果, 采用每相由一个单相逆变器组成的 STATCOM 电路模型对不平衡负荷补偿进行了仿真研究, 系统电压为三相 380 V。仿真采用 PSCAD 软件, 逆变器采用 SHE- PWM 调制, 开关频率为 500 Hz。负载包括两部分, 一为接成星型的对称电阻性负荷, 每支路电阻为 2.0 Ω; 另一部分是波动性感性负荷, 电抗值在 7.8 mh 到 15.7 mh 之间波动。

5.1　动态补偿特性

图 6 为一随机波动的不平衡负荷电流波形, 图 7 为投入补偿后系统电流波形。可见, STATCOM 可以快速地补偿波动的不平衡负载。

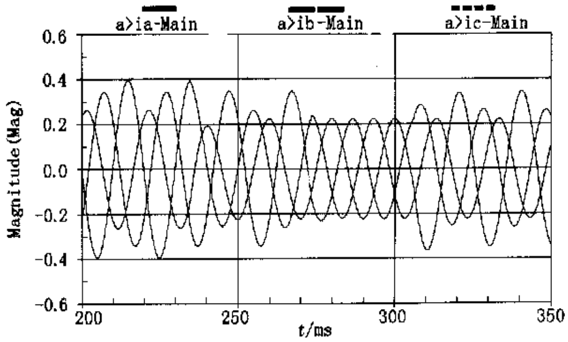

图 6　波动性不平衡负荷电流波形

Fig. 6　Fluctuating unbalanced load current wareform

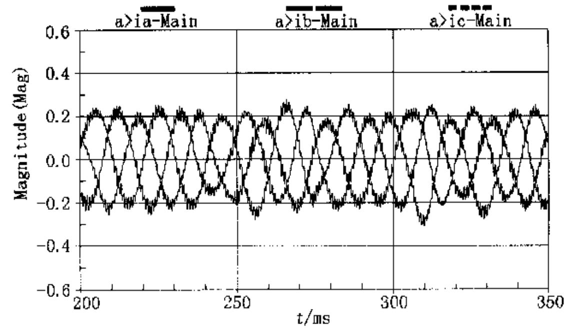

图 7　投入 STATCOM 后的系统电流波形

Fig. 7　Balanced system line current after compensation

5.2　综合补偿特性

采用如图 5 所示的综合补偿控制方法时的补偿效果见图 8 和图 9。负载情况与稳态补偿时相同。图 8 为补偿前(虚线)后(实线)的负载相电压均方根值波形, 图 9 为补偿后系统的电流波形。可见, 采用综合补偿可以在补偿不平衡的同时兼顾负载电压的稳定。

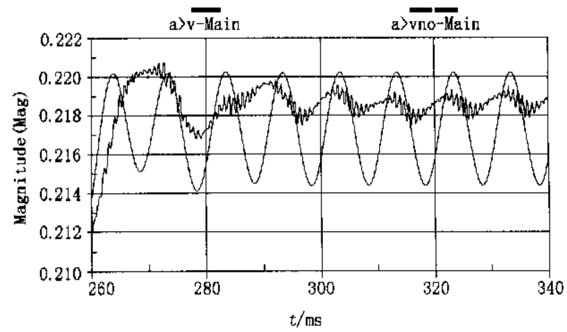

图 8　综合补偿前后的负载电压对比

Fig. 8　Comparison of load voltage with and without integrated compensation

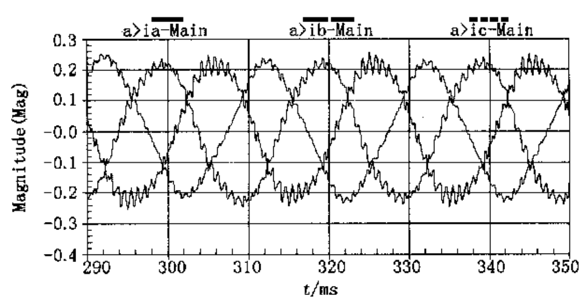

图 9　采用综合补偿后的系统电流波形

Fig. 9　Balanced system line current waveform after integrated compensation

6 结论

链式 STATCOM 由于具有分相控制能力、输出无功电流谐波小、响应速度快等优点而适合于不平衡负荷的平衡化补偿。各相补偿电流可以通过采用对称分量法的矢量变换得到。为了在较低开关频率下保证输出电流谐波畸变较小并保持电容电压稳定,应采用 SHE-PWM 脉冲调制方法。仿真结果表明,所提综合补偿控制方法可有效地对负载电压波动和不平衡特性进行补偿。

参考文献:

[1] 林海雪. 电力系统的三相不平衡[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[2] 胡雨辰. 通用电能质量监测与控制器的研究[D]. 北京: 清华大学电机工程与应用电子技术系, 2001.

[3] Sun Jian, Grotstollen Horst. Solving Nonlinear Equations for Selective Harmonic Eliminated PWM Using Predicted Initial Values. Conf. Proc. IECON'92, 1992, 259-264.

[4] 孙树勤. 无功补偿的矢量控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[5] 刘炳. 应用于不对称补偿的D-STATCOM[D]. 北京: 清华大学电机工程与应用电子技术系, 2001.

收稿日期: 2003-06-26

作者简介:

罗承廉(1945-), 男, 教授级高工, 从事电力系统及 FACTS 技术研究工作;

林烽(1971-), 男, 硕士, 从事电力电子技术及电能质量研究工作;

刘遵义(1963-), 男, 教授级高工, 博士, 从事电力系统及 FACTS 技术研究工作。

Balancing compensation of 3-Ph unbalanced load with cascade inverters based STATCOM

LUO Cheng-lian, LIN Feng, LIU Zun-yi, JI Yong, LIU Wen-hua

(Henan Electric Power Dispatching and Communication Center, Zhengzhou 540000, China)

Abstract: Due to the separate phase control capability, low output current harmonics and fast response characteristics, cascade inverters based STATCOM is suitable for balancing compensation of 3-Ph unbalanced load. Main circuit configuration and integrated voltage-reactive power control scheme for balancing compensation with cascade inverters based STATCOM is proposed. The 3-Ph compensation current is obtained through vector transform with symmetrical weight method. The single phase reactive power is calculated with single phase instantaneous reactive power concept. Selective harmonics eliminated PWM (SHE-PWM) is employed to ensure that the THD of output current is less than 5% and the DC voltage is controlled. Simulation results verify the effects of the fast response of output reactive power for balancing the unbalanced load.

Key words: STATCOM; unbalanced load; balancing compensation