

不平衡补偿时静止同步 补偿器的分相控制

王建勋,伏祥运,纪延超

(哈尔滨工业大学 电气工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:通过分析不平衡补偿时补偿器输出电压与补偿电流的关系,并利用三相三线系统中没有零序电流通道的特点,证明了通过向补偿器三相输出电压中加入零序分量,能够达到使其输出电压幅值相同的目的。基于此原理,提出一种配网静止同步补偿器在不平衡补偿时的分相控制方法。该控制方法以各相无功功率为零作为控制目标,在保持调制比相同的情况下通过调节补偿器各相输出电压相对于系统电压的相角差 δ 来调节各相的输出电流,实现了补偿器的分相控制。通过分析说明了采用该控制方法的系统达到稳态时,电网电流三相平衡且功率因数为 1,达到了无功补偿和负载功率平衡的目的。利用 Matlab 对分相控制方法进行仿真,仿真结果验证了该控制方法的正确性和有效性。

关键词:电力系统;无功补偿;配网静止同步补偿器

中图分类号: TM 761⁺.12

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)09-0027-04

0 引言

随着电力电子技术的发展,基于电压源型逆变器的配网静止同步补偿器 D-STATCOM (Distribution STATic synchronous COMPensator) 以其动态响应速度快、结构紧凑、输出电流波形品质高等优点受到了人们的普遍重视^[1-3]。

近年来,电弧炉、轧钢机、泵、电动机车等冲击性大容量不对称负载的大量使用,严重影响了公共连接点的电压质量^[4-5],引起了电压不对称、波动和闪变等问题,这将对公共连接点用电设备的运行产生影响甚至造成用电设备的损坏。随着人们对电能质量的逐渐重视,D-STATCOM 不对称补偿时的控制方法成为国内外学者研究的热点^[6-9]。

D-STATCOM 控制方式主要有直接控制和间接

控制 2 种。直接控制就是采用跟踪型 PWM 技术对电流瞬时值进行反馈的一种控制方式^[1],直接控制对逆变器的开关频率要求较高,适合于作开关频率较高的小容量补偿器的控制。 $Q-\delta$ 控制是一种常用的间接控制方式,以无功功率为控制目标,通过调节补偿器输出电压相对电网电压的相位差 δ 来控制补偿器的输出电流^[10]。在负载不平衡时,就需要采用对调制比 M 和相角差 δ 协调控制的方式。这种方式在调节无功功率时需要同时调整调制比 M 和相角差 δ ,对系统的稳定性有一定的不利影响^[11]。在补偿器输出感性无功时,补偿器的调制比较低,直流电压利用率低,输出电流的谐波含量增大。

现提出一种对补偿器各相输出电压相角差 δ 进行调节来控制各相输出电流的分相控制方法,能够有效地对三相不平衡负载进行平衡补偿。同时,该方法不需要复杂的坐标变换,具有控制变量少、计算简

收稿日期:2006-09-19;修回日期:2007-03-06

由功率理论可知,这时电网的三相电流都与对应相的电压同相位,即有

$$I_{sa}=k_a U_{sa}, \quad I_{sb}=k_b U_{sb}, \quad I_{sc}=k_c U_{sc} \quad (13)$$

同时,由于电网电压是三相对称的,因而有

$$U_{sa}+U_{sb}+U_{sc}=0 \quad (14)$$

同样,根据基尔霍夫电流定律可知:

$$I_{sa}+I_{sb}+I_{sc}=0 \quad (15)$$

由式(13)~(15),可得:

$$k_a=k_b=k_c \quad (16)$$

由式(13)(16)可知,在电网电压对称的情况下,当系统稳定后,电网电流与对应相的电网电压同相位,而且幅值相同,达到了负载平衡的目标。

当电网电压三相不对称时,由于其中含有的零序分量对补偿器的输出电流没有影响,可以不予考虑,三相电压中的正序和负序分量仍然满足式(14)。同样可以达到补偿各相电流的幅值和对应的相电压同相位,补偿后电网电流的幅值和对应相电压的幅值成相同的比例。

2.2 调制方式

调制方法对 D-STATCOM 输出电流的谐波特性有很大的影响。由于补偿器输出电压的调制比固定,方便了特定消谐波调制技术的运用。为了能够在保证总谐波畸变率满足一定水平的情况下,进一步降低开关频率,减小开关损耗,文中采用优化特定消谐^[12-13]。由于电压调制波的相位需要调节,在特定消谐计算时,3 的倍数次谐波同样需要消除。采用 15 个开关角的优化消谐 PWM 调制技术,谐波的主频带在 41 次和 43 次附近。开关角度数如下:

$$\alpha_1=4.022^\circ, \alpha_2=8.65^\circ, \alpha_3=12.08^\circ, \alpha_4=17.31^\circ$$

$$\alpha_5=20.15^\circ, \alpha_6=25.97^\circ, \alpha_7=28.24^\circ, \alpha_8=34.61^\circ$$

$$\alpha_9=36.37^\circ, \alpha_{10}=43.25^\circ, \alpha_{11}=44.54^\circ, \alpha_{12}=51.88^\circ$$

$$\alpha_{13}=52.76^\circ, \alpha_{14}=60.50^\circ, \alpha_{15}=61.05^\circ$$

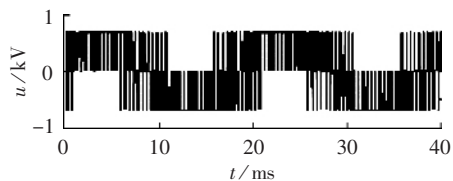
3 仿真结果分析

对所提出的分相控制方法,用 Matlab 建立模型,进行了计算机仿真研究,具体的仿真系统参数如下:电网相电压 220 V,电压频率 50 Hz,连接电感 2 mH,连接电阻 0.2 Ω ,直流侧电容 5 000 μF 。

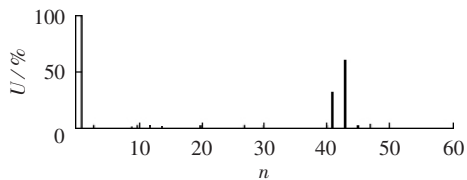
图 3 为 D-STATCOM 中逆变器输出线电压的波形和频谱(n 为谐波次数)。从频谱图中可以看出,输出线电压的谐波主要集中在 41 次和 43 次附近,这说明优化特定消谐能够有效地将谐波主频带后推,降低了连接电抗的滤波压力,也降低了输出电流的谐波含量,提高了补偿器输出电流的波形品质。

图 4 为三相负载电流的波形,由图中可见,三相负载电流存在很大的不平衡,幅值和相角都存在很大差异。图 5 为补偿后电网侧的三相电流,这时三相电流平衡,达到了负载平衡的目的。图 6 给出了 A 相的电网侧电压和电流波形,可以看出电网电流和电网电压同相位,功率因数为 1,达到了无功功率补偿的目的。B 相和 C 相情况与 A 相相同,此处略。

图 7 给出了补偿器达到图 5 给出的补偿效果



(a) 补偿器线电压波形



(b) 补偿器线电压频谱

图 3 补偿器线电压的波形及频谱

Fig.3 Waveform and spectrum of D-STATCOM output voltage

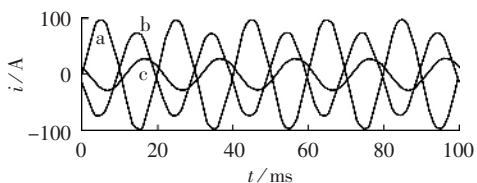


图 4 负载三相电流波形

Fig.4 Waveforms of three-phase currents at load side

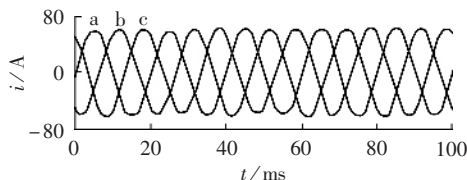


图 5 电网三相电流波形

Fig.5 Waveforms of three-phase currents at line side

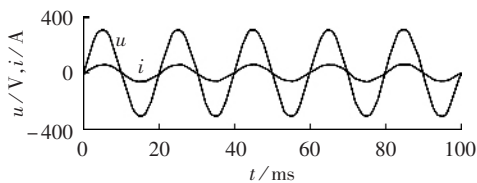


图 6 A 相电网电压和电流波形

Fig.6 Waveforms of voltage and current of phase A

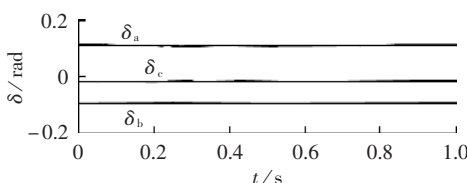


图 7 三相输出电压的相位差 δ

Fig.7 Phase difference δ s of three-phase output voltages

时,补偿器三相输出电压的相角差 δ 。由图可见,在稳态时,补偿器输出三相电压与电网电压的相角差保持稳定,三者之间存在一定差异。这说明通过对补偿器输出电压的相角差 δ 调节,能够调节各相输出

电流,从而能够进行负载平衡和不平衡无功功率补偿。

4 结语

在不平衡补偿时,D-STATCOM 输出电压中含有正序和负序分量。因此,其三相输出电压幅值和其相对系统的相角差 δ 都存在差异。利用三相三线制系统中没有零序电流通道的特点,通过向补偿器输出电压中加入零序分量的方法,能够达到使其输出电压幅值相同的目的。基于此,提出了一种保持补偿器各相输出电压调制比固定,仅调节各相输出电压相角来控制补偿器各相输出电流的分相控制方法。该控制方法以电网侧各相的无功功率为零作为控制目标,当系统达到稳态时,电网电流三相平衡且功率因数为1。利用调制比固定的特点,文中采用优化特定消谐技术提高输出电流的波形品质。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨军,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [2] SCHAUDER C,MEHTA H. Vector analysis and control of advanced static var compensators[J]. IEE Proceedings,1993,140(4):299-306.
- [3] PENG Fang-zheng,LAI Jih-sheng. Dynamic performance and control of a static var generator using cascade multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1997,33(3):748-755.
- [4] 刘小河,赵刚,于娟娟. 电弧炉非线性特性对供电网影响的仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6):30-34.
LIU Xiao-he,ZHAO Gang,YU Juan-juan. Simulations on the impaction in power supply network caused by the nonlinear characteristics of electric arc furnace system[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(6):30-34.
- [5] ZHANG C,FAHMI N R. Modelling and analysis of a cascade 11-level inverters-based SVG with control strategies for electric arc furnace application [J]. IEE Proceedings,2003,150(2):217-223.
- [6] 朱永强,刘文华,邱东刚,等. 基于单相 STATCOM 的不平衡负荷平衡化补偿的仿真研究[J]. 电网技术,2003,27(8):42-45.
ZHU Yong-qiang,LIU Wen-hua,QIU Dong-gang,et al. Simulation of balancing compensation of unbalanced load based on single phase STATCOM [J]. Power System Technology,2003,27(8):42-45.
- [7] BLAZIC B,PAPIC I. Improved D-STATCOM control for operation with unbalanced currents and voltages[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(1):225-233.
- [8] ESCOBAR G,STANKOVIC A M,MATTAVLLI P. An adaptive controller in stationary reference frame for D-STATCOM in unbalanced operation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2004,51(2):401-409.
- [9] GARCIA-GONZALEZ P,GARCIA-GERRADA A. Control system for a PWM-based STATCOM[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(4):1252-1257.
- [10] 郭锐,刘国海. 静止同步补偿器数学模型及其无功电流控制研究[J]. 电力自动化设备,2006,26(1):21-24.
GUO Rui,LIU Guo-hai. Study on STATCOM model and its control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(1):21-24.
- [11] 刘炳. 应用于不对称补偿的 D-STATCOM[D]. 北京:清华大学,2001.
LIU Bing. D-STATCOM applied in unbalanced current compensation[D]. Beijing:Tsinghua University,2001.
- [12] 佟为明,王宇红,程树康,等. 特定消谐技术的优化[J]. 电力系统自动化,2001,25(17):21-24.
TONG Wei-ming,WANG Yu-hong,CHENG Shu-kang,et al. Optimization of selective harmonic eliminations[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(17):21-24.
- [13] 黄瀚,纪延超,张辉,等. 优化特定消谐 PWM 技术[J]. 中国电机工程学报,1997,17(5):344-347.
HUANG Han,JI Yan-chao,ZHANG Hui,et al. The optimal technique for selected harmonics elimination[J]. Proceedings of the CSEE,1997,17(5):344-347.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

王建贻(1972-),男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,博士,主要研究方向为电能质量检测和控制;

伏祥运(1977-),男,江苏赣榆人,博士研究生,主要研究方向为无功功率补偿和谐波抑制(E-mail:fuxiangyun_2000@163.com);

纪延超(1962-),男,河南洛阳人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

Individual phase control of D-STATCOM under unbalanced compensation

WANG Jian-ze,FU Xiang-yun,JI Yan-chao

(Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China)

Abstract: The relationship between the output voltage and compensating current of D-STATCOM under unbalanced compensation is analyzed. Because there is no zero sequence current in three-phase three-wire system,it is proved that,the three-phase output voltages of compensator may get same magnitude by adding zero sequence components to them. Based on this principle,an individual phase control method of D-STATCOM under unbalanced compensation is proposed,which keeps the reactive power of each phase zero as the control objective,adjusting the output current of each phase by regulating its phase difference δ between compensator output voltage and line voltage while maintaining the modulation index constant. Analysis shows that,when the system controlled by this method reaches steady state,the three-phase line currents are balanced and the power factor is one. Matlab-based simulative result verifies its validity and feasibility.

Key words: power system; reactive power compensation; D-STATCOM