

静止无功发生器负序补偿时直流电容选择

黄 华, 陈赤汉, 刘 磊, 李成博

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘 要:静止无功发生器(SVG)在补偿三相不平衡负载时,会输出负序电流,导致直流侧电压存在2倍于电网频率的波动,如果直流电压取值较小,其波动超过一定范围后,使得控制效果变差,严重时会导致装置失去稳定。从理论上推导出SVG负序补偿时的最小直流侧电容,将SVG负序补偿时直流电压的2倍频波动大小限制在允许范围之内,保证了SVG装置的正常运行,PSCAD/EMTDC仿真试验验证了电容选择方法的正确性。

关键词:静止无功发生器;直流电容;负序补偿;PSCAD/EMTDC

中图分类号:TM761

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)05-0034-04

随着工业经济的不断发展,越来越多的非线性、不对称、冲击性负荷开始在电网中应用,一方面导致电网的电能质量恶化,另一方面也降低了设备的效率和使用寿命,因此必须对这类非线性、不对称、冲击性负荷进行相应的补偿^[1,2]。静止无功发生器(SVG)技术作为动态无功补偿的发展方向,是目前国内外研究的热点。SVG以其占地面积小、输出特性理想、无功可连续调节、响应速度快、补偿容量受系统电压影响小,同时可以进行负序和谐波补偿等优点,成为当前某些领域电能治理的优选设备^[3,4]。直流电容作为SVG的关键设备之一,起着稳定直流侧电压的作用,而直流电压的稳定与否关系着SVG能否达到理想的控制目标。在SVG对三相平衡负荷进行无功补偿时,直流电容仅起着直流电压支撑的作用,理论上可以选取容值比较小的直流电容。当SVG补偿三相不平衡负载时,SVG会输出负序电流,导致直流侧电压存在2倍于电网频率的波动,SVG补偿的负序电流越大,直流电压波动越大。如果直流电压取值较小,直流电压的波动超过一定范围后,可导致控制效果变差,严重时会使装置失去稳定。从理论上推导出SVG负序补偿时满足一定运行条件的最小直流侧电容值,这些条件包括将SVG负序补偿时直流电压的两倍频波动限制在允许范围之内,保证了SVG装置的正常运行。最后通过PSCAD/EMTDC仿真验证了电容容值选择方法的正确性。

1 SVG原理与负序控制

SVG的接入系统如图1所示,其基本原理就是将自换相桥式电路通过连接电抗器并联在电网上,适当调节桥式电路交流侧输出电压的相位和幅值,或者直接控制其交流侧电流,可以使该电路吸收或者发出满足要求的无功电流,达到动态无功补偿的目的。根据

基尔霍夫电流定律,有:

$$i_{s_abc} + i_{c_abc} = i_{l_abc} = i_{l_abc_p} + i_{l_abc_q} \quad (1)$$

SVG补偿负载无功的控制原理,就是检测出负载电流中的无功分量 $i_{l_abc_q}$,同时由SVG输出一个与该无功分量大小相等,方向相反的电流 i_{c_abc} ,以补偿负荷电流的无功分量,使得最终供电系统仅提供负载电流中的有功分量,即 $i_{s_abc} = i_{l_abc_p}$ 。

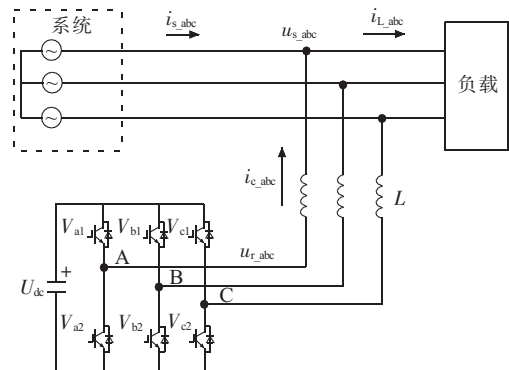


图1 SVG接入系统

当负载电流三相不对称时,SVG通过负序控制功能输出负序电流来补偿负载中的负序电流,使得供电系统的电流仍保持三相对称。负序控制原理^[6]如图2所示:SVG在 dq 坐标系下检测出负载电流中的负序电流参考值 \bar{i}_{dref} 和 \bar{i}_{qref} ,与SVG输出的 dq 坐标系下的负序电流 \bar{i}_{cd} 和 \bar{i}_{cq} 作差,通过 dq 轴电流解耦控制和系统负序电压前馈补偿控制等,得到 dq 坐标系下的调制波 \bar{u}_{dref} 和 \bar{u}_{qref} ,然后经过负序旋转坐标变换,输出 abc 三相下的负序调制波 \bar{u}_{ref_abc} ,该负序调制波和正序调制波相加后通过SPWM控制输出PWM脉冲去驱动IGBT。由于SVG输出电流中有负序电流分量,因此直流侧电容会呈现2倍于电网频率的直流电压波动,负序电流越大,该电压波动也就越大。为了获得良好的控制效果,必须将直流电容增大到一定值,确保直流电压的波动

在允许的范围之内。

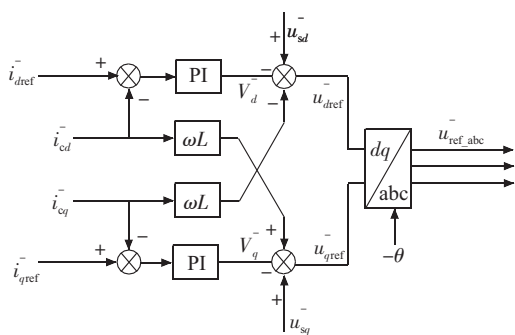


图2 SVG 负序控制

2 最小直流电容计算

目前主要有以下 2 种直流电容容值选择方法^[5]。

(1) 按直流电容的储能与 SVG 输出额定容量之比进行选择:

$$K_C = \frac{C\omega_0 U_{dc}^2}{Q_{svg}} \quad (2)$$

(2) 按直流电容的惯性时间常数进行选择:

$$H_C = \frac{C\omega_0 U_{dc}^2}{2Q_{svg}} \quad (3)$$

式中: ω_0 为母线电压角频率; U_{dc} 为直流侧电压; Q_{svg} 为 SVG 额定容量; K_C 为假设将该直流电容接在角频率为 ω_0 、母线电压为 U_{dc} 的交流系统中,其产生的无功功率与 SVG 实际输出额定无功功率之比,该值一般在 1.0 附近; H_C 为 SVG 直流电容的惯性时间常数,一般为几百毫秒。

在进行最小直流电容计算时,先作如下假设:(1) SVG 开关频率在 1 kHz 以上,由于开关动作引起的直流电压波动远小于负序电流引起的波动;(2) 忽略 SVG 开关函数中的高次谐波分量,只考虑基波正、负分量;(3) SVG 只和系统进行无功交换,认为没有有功损耗,即 SVG 的输出电流和电压的相角差为 $\pm 90^\circ$ 。SVG 开关函数方程如式(4)所示:

$$\begin{cases} sw_a(t) = m \sin \omega t \\ sw_b(t) = m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ sw_c(t) = m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

式中: m 为调制比; $sw(t)$ 为开关函数; ω 为工频角频率; t 为时间变量。假设 SVG 输出容性电流,如式(5)所示:

$$\begin{cases} i_a(t) = I_a \cos \omega t \\ i_b(t) = I_b \cos(\omega t - 120^\circ) \\ i_c(t) = I_c \cos(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

式中: I_a, I_b, I_c 分别为三相电流幅值。电容电压微分方程如式(6)所示:

$$C = \frac{du_{dc}}{dt} = \sum_{i=ab,c} sw_i(t) i_i(t) \quad (6)$$

式中: C 为直流侧电容容值; u_{dc} 为直流侧电压瞬时值; $i(t)$ 为电流瞬时值。将式(4)和(5)代入式(6),求解得:

$$u_{dc} = U_{dc} + \Delta u_{dc} \quad (7)$$

式中: U_{dc} 为直流电压稳态分量; Δu_{dc} 为直流电压波动分量。波动分量如式(8)所示:

$$\Delta u_{dc} = \frac{m}{4\omega C} [I_a \cos 2\omega t + I_b \cos(2\omega t + 120^\circ) + I_c \cos(2\omega t - 120^\circ)] \quad (8)$$

将式(8)进一步简化,可得式(9):

$$\Delta u_{dc} = \frac{m I_m}{4\omega C} [I_x \cos(2\omega t) + I_y \sin(2\omega t)] \quad (9)$$

其中:

$$\begin{cases} I_x = (I_a - I_b/2 - I_c/2)/I_m \\ I_y = (-\sqrt{3} I_b/2 + \sqrt{3} I_c/2)/I_m \end{cases} \quad (9a)$$

式中: I_m 为基波正序电流幅值; I_x, I_y 为正交的波动电流分量系数。因此直流电压波动的幅值为:

$$\Delta u_{dc} = \frac{m}{4\omega C} \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \quad (10)$$

假设 SVG 输出 A 相基波正序电流为 $I_m \angle 0^\circ$,负序电流为 $\varepsilon I_m \angle \theta$, ε 为输出电流不平衡度,范围为 $0 \sim 0.7$, θ 为基波负序电流相位,那么三相电流幅值分别为:

$$\begin{cases} I_a = I_m \sqrt{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2 + (\varepsilon \sin \theta)^2} \\ I_b = I_m \sqrt{[\varepsilon \cos(\theta + 120^\circ) - \frac{1}{2}]^2 + [\varepsilon \sin(\theta + 120^\circ) - \frac{\sqrt{3}}{2}]^2} \\ I_c = I_m \sqrt{[\varepsilon \cos(\theta - 120^\circ) - \frac{1}{2}]^2 + [\varepsilon \sin(\theta + 120^\circ) + \frac{\sqrt{3}}{2}]^2} \end{cases} \quad (11)$$

令 $f(\varepsilon, \theta) = \sqrt{I_x^2 + I_y^2}$,并将式(11)与式(9a)联合代入。利用 MATLAB 计算工具,以 θ 为变量,求解出在各不平衡度 ε 下 $f(\varepsilon, \theta)$ 的最大值 $f(\varepsilon)$, $f(\varepsilon)$ 与 ε 的关系如图 3 所示,显然不平衡度越大, $f(\varepsilon)$ 越大,即直流侧电压的波动也越大。

假设直流侧允许电压波动不超过 $\Delta U_{dc, \max}$,则直流侧电容值应满足:

$$C > \frac{m I_m}{4\omega \Delta U_{dc, \max}} f(\varepsilon) \quad (12)$$

3 PSCAD 仿真

在 PSCAD/EMTDC 中搭建 SVG 仿真系统,如图 4 所示,220 kV 系统短路阻抗 6 000 MV·A,变压器容量 50 MV·A,220/10 kV,短路阻抗百分比 10%,SVG 容量 10 MVar,直流侧电压 18 kV,连接电抗 8 mH,开

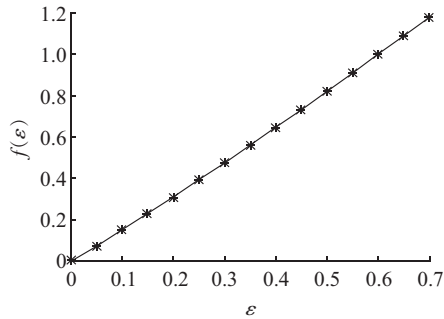


图3 负序电流大小与直流电压波动关系

关频率1.95 kHz, 负荷电流正序分量峰值为额定值816.6 A,不平衡度为0.3。

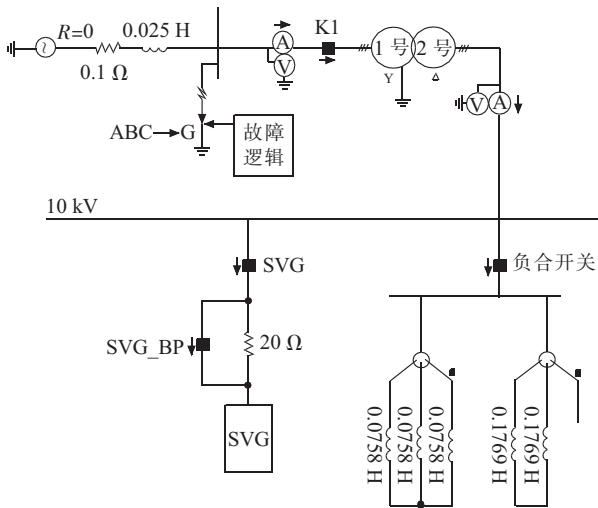
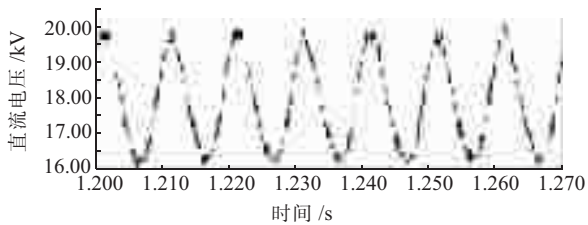


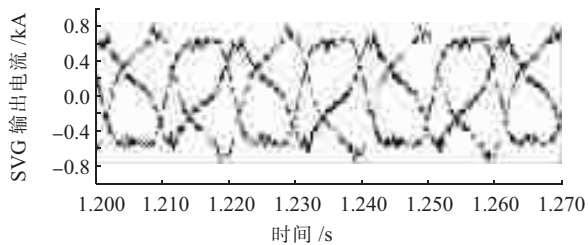
图4 仿真模型

不平衡度 ε 为0.3时, $f(\varepsilon)=0.479, I_m=816.6$ A, 直流电压允许波动范围假定为5%, 即 $\Delta U_{dc,max}=900$ V, 调制比 m 取0.9, 代入式(12), 得 $C=311.5 \mu\text{F}$ 。

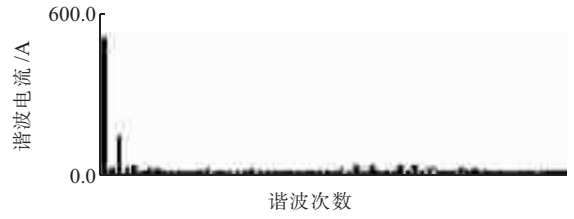
SVG 控制方式取无功控制, 自动补偿负载无功, 将直流电容分别取 $156 \mu\text{F}, 311.5 \mu\text{F}, 623 \mu\text{F}$ 进行仿真, 仿真结果如图(5—7)所示。



(a) 直流侧电压

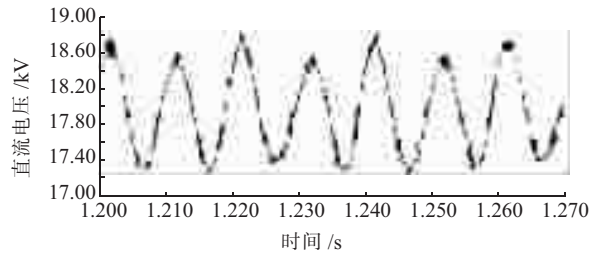


(b) SVG 输出电流

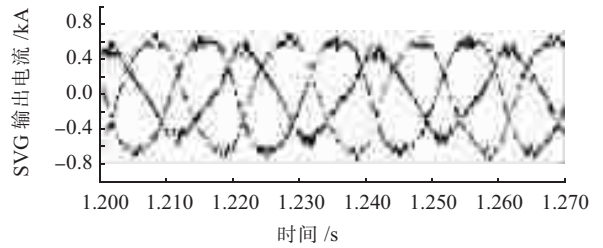


(c) SVG 电流 FFT

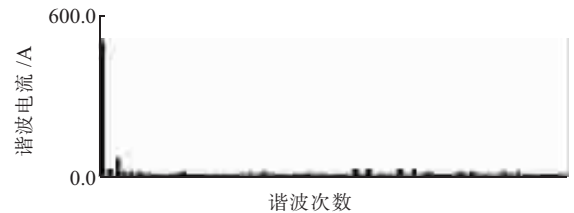
图5 直流电容 $156 \mu\text{F}$ 时直流电压波形和 SVG 输出电流及其 FFT 波形



(a) 直流侧电压

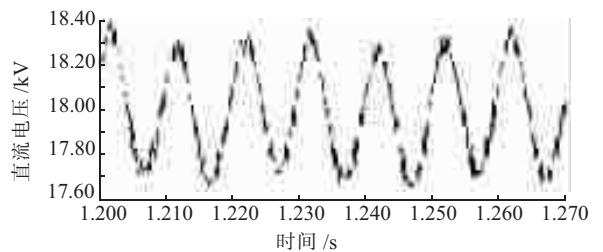


(b) SVG 输出电流

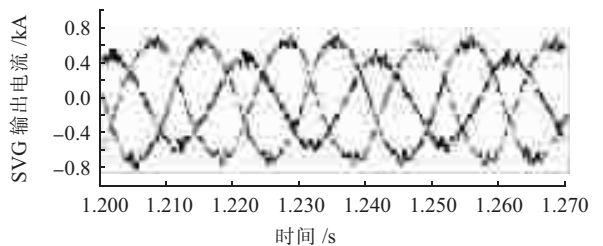


(c) SVG 电流 FFT

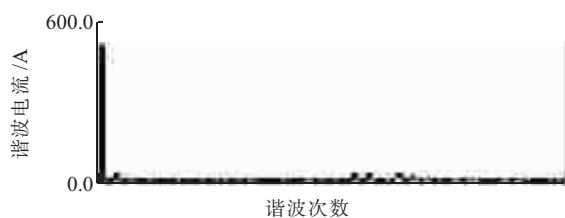
图6 直流电容 $311.5 \mu\text{F}$ 时直流电压波形和 SVG 输出电流及其 FFT 波形



(a) 直流侧电压



(b) SVG 输出电流



(c) SVG 电流 FFT

图 7 直流电容 623 μF 时直流电压波形和 SVG 输出电流及其 FFT 波形

由图(5—7)可知:当直流电容为计算的最小容值 311.5 μF 时,直流侧电压波动刚好在允许的 5% 范围以内,验证了最小容值计算的正确性;而当直流电容为最小容值的一半时,直流侧电压波动范围约为 10%;当直流电容为最小容值的 2 倍时,直流侧电压波动范围约为 2.5%。当直流电容为最小容值的一半时,SVG 输出电流中含有较大的 3 次谐波电流分量,电流 THD 为 26.5%,这是因为直流侧电压的波动范围近 10%,较大的直流电压 2 倍工频波动在交流侧耦合出 3 次谐波。随着电容的增大,直流电压波动范围减小,3 次谐波含量也减少,电容分别为最小容值一半、最小容值、最小容值 2 倍时,3 次谐波幅值为 121.7 A, 49.8 A, 15.9 A。

4 结束语

针对静止无功发生器在补偿负载负序电流时直流电容电压出现波动的问题,从理论上推导出 SVG 负序补偿时的最小直流侧电容容值,将 SVG 负序补偿时直

流电压的 2 倍频波动限制在允许范围之内,保证了 SVG 装置的正常运行。最后通过 PSCAD/EMTDC 仿真,验证了直流电容容值选择方法的正确性。

参考文献:

- [1] 许树楷,宋 强,刘文华.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): 193-98.
- [2] 邹 宁,方存洋,刘育鑫,等.PSCAD/EMTDC-MATLAB 联合仿真技术在 SVC 控制系统仿真建模中的应用[J].江苏电机工程,2012,31(9):40-44.
- [3] 李 可,卓 放,李红雨,等.直接电流控制的静止无功发生器研究[J].电力电子技术,2003,37(3): 8-11.
- [4] 杨达亮,卢子广,姚普粮.直接电流控制的配电网静止无功补偿器研制[J].电力电子技术,2010,44(2):51-53.
- [5] 王仲鸿,姜齐荣,沈 东.关于新型静止无功发生器模型参数及暂态控制模型选择讨论[J].电力系统自动化,1999,23(24): 43-45.
- [6] 黄 华,陈赤汉,张 磊,等.静止无功发生器负序和谐波电流抑制研究[J].电工电气,2012,177(9):18-21.

作者简介:

黄 华(1984),男,江苏海门人,硕士,从事电力电子技术在电力系统中的应用研究;

陈赤汉(1962),男,陕西西安人,高级工程师,从事电力电子技术在电力系统中的应用研究;

刘 磊(1984),男,陕西榆林人,工程师,从事电力电子技术在电力系统中的应用研究;

李成博(1985),男,陕西西安人,硕士研究生,从事电力电子技术在电力系统中的应用研究。

DC Capacitor Selection of Static Var Generator for Negative Sequence Compensation

HUANG Hua, CHEN Chi-han, LIU Lei, LI Cheng-bo
(Nari-Relays Electric Co. Ltd, Nanjing 211102, China)

Abstract: Direct current capacitor, which would affect the voltage of DC side, is one of the key equipment of static var generator. The DC voltage's stability relates to the capacity of SVG to achieve ideal control target. When a SVG compensates a three-phase equilibrium load, DC capacitor only plays the role of supporting DC voltage. In this case, a small DC capacitor is proposer in theory. However when a SVG compensates a three-phase unbalanced load, the negative sequence current would be produced. In this case, the DC side voltage would fluctuate in a frequency which is two times of power grid's operational frequency. Apparently, the larger the negative sequence current is, the greater the fluctuation of DC side voltage would be. Therefore, if the DC capacitor is not large enough, the DC side voltage fluctuation will exceed the permissible range, which will lead to a poor control effect. This paper deduces theoretically the minimum DC capacitor for a negative sequence current compensation. A method to force the DC side voltage fluctuation in the permissible range to ensure the normal operation of SVG is proposed. Finally we verify the correctness of the DC capacitor selection method through the PSCAD/EMTDC simulation.

Key words: static var generator; connection inductance; negative sequence compensation; PSCAD/EMTDC

欢迎投稿 欢迎订阅