

静止无功发生器直流侧电压对无功 补偿特性的影响研究

赵国鹏, 刘进军

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为设计静止无功发生器的直流侧电压, 分析了直流侧电压的取值对补偿特性的影响, 提出了直流侧电压的设计方法. 该方法通过输出的无功电流设计完全补偿无功功率时所需的直流侧电压理论最小值, 当直流侧电压小于理论最小值时, 在正弦调制方法和非正弦调制方法下, 分别通过功率因数和谐波电流设计直流侧电压, 并且定量分析了在非正弦调制方法下保证电源基波功率因数为1时注入电网的谐波电流值. 与工程应用中通过工程经验或者通过仿真来设计直流侧电压的方法相比, 该方法可以定量地设计直流侧电压, 减小了直流侧电压设计的盲目性. 实验验证了所提出的设计方法的有效性.

关键词: 静止无功发生器; 直流侧电压; 补偿特性

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)04-0066-05

Analysis and Specification of DC Side Voltage in Static Var Generator Regarding Compensation Characteristics

ZHAO Guopeng, LIU Jinjun

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The design scheme of DC side voltage in Static Var Generator (SVG) is presented in a quantitative manner. The extensive analysis of the influence of DC side voltage on the performance of SVG is carried out, and a specification of the DC side voltage rated value is presented. A required lowest value of DC side voltage for full compensation (a unity total power factor) is obtained according to the output reactive current. For the situation of DC voltage is smaller than the above-obtained lowest value, the DC side voltage can be designed by using the power factor and harmonic current for the sinusoidal modulation control and over modulation control. Compared with the conventional design methods according to the experiences or simulations, the proposed scheme can be employed to design the DC side voltage quantitatively. The experiments verify its effectiveness.

Keywords: static var generator; DC side voltage; compensation characteristic

静止无功发生器(SVG)是并联于公共连接点(PCC)的电力电子装置, 往往用来补偿负载的无功功率, 或者通过对无功功率的控制来调节电网电压的幅度^[1-6]. 静止无功发生器包含一个电压型逆变

器, 控制系统控制电压型逆变器的直流侧电压为一个恒定值^[1, 7]. 直流侧电压的取值影响静止无功发生器的补偿特性, 直流侧电压必须足够高才能得到好的补偿效果. 但是, 电容电压越高要求器件的耐压

就越高,增加了逆变器的成本.在工程中,设计直流侧电压的值时,往往由工程经验确定.当直流侧电压小于理论最小值时没有定量分析补偿特性与直流侧电压的关系.

本文分析了直流侧电压取值对补偿特性的影响.首先,通过对等效电路的分析,得出一个完全补偿无功功率时所需的直流侧电压理论最小值;然后,当直流侧电压小于理论最小值时,本文得出了补偿特性与直流侧电压的关系,分为正弦控制和非正弦控制两种情况.

1 系统结构

SVG主电路结构如图1所示^[1],图2给出了单相等效电路(假设系统三相对称).

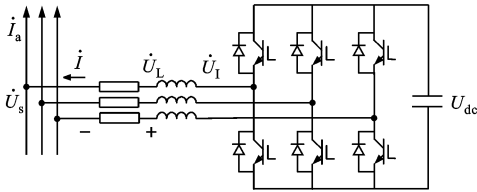


图1 SVG主电路

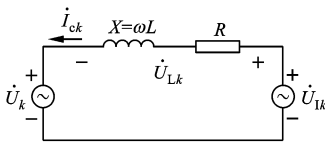


图2 单相等效电路

2 直流侧电压取值的分析

静止无功发生器系统有两种控制方法:一种是正弦调制方法,即调制比不超过1;另一种是非正弦调制方法,保证基波功率因数为1,注入谐波,基波调制比大于1.补偿分为超滞后补偿和超前补偿两种情况.

2.1 滞后补偿

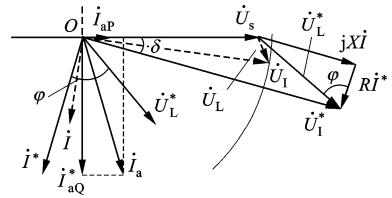
当负载无功电流落后于负载电压时,SVG是滞后补偿,相量图如图3所示.

在图3中,如果补偿后电源功率因数为1,那么输出电流等于指令电流.由正弦定理可得

$$\frac{U_L^*}{\sin\delta} = \frac{U_s}{\sin(90^\circ - \varphi)} = \frac{U_1^*}{\sin(90^\circ + \varphi - \delta)} \quad (1)$$

直流侧电压可以表示为

$$U_{dc}^* = \frac{2^{1/2} U_s}{k \cos\varphi} \cos\left(\varphi - \frac{1}{2} \arcsin \frac{2RI_{aQ}}{U_s}\right) \quad (2)$$



i_{aP} 和 i_{aQ} 分别是 a 相输出的有功电流和无功电流;符号 * 表示完全补偿情况下的变量; i^* 表示无功指令电流;

$\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_s$ 之间的相位角差为 δ ; $\tan\varphi = \omega L/R$

图3 滞后补偿时的相量图

式中: k 为直流侧电压最大利用率,当 SPWM 控制时, $k=1/2$, 当 SVPWM 控制时, $k=3^{1/2}/3$. 另外, 电源电压角速度 $\omega=314 \text{ rad/s}$.

式(2)表示当补偿后电源功率因数为1时的直流侧电压理论最小值,标幺值形式为

$$U_{dc_pu}^* = \frac{2^{1/2}}{k \cos\varphi} \cos\left[\varphi - \frac{1}{2} \arcsin(2k_L \cot\varphi)\right] \quad (3)$$

式中: U_s 和 $k_L = \omega L I_{aQ}/U_s$ 为标幺值基准.

当超前补偿时,直流侧电压必须满足条件 $U_{dc} > 2^{1/2} U_s/k$. 当 $2^{1/2} U_s/k < U_{dc} < U_{dc}^*$ 时,功率因数减小.由正弦定理得

$$\frac{U_L}{\sin\delta'} = \frac{U_s}{\sin(90^\circ - \varphi)} = \frac{U_1}{\sin(90^\circ + \varphi - \delta')} \quad (4)$$

式中: δ' 是输出电压 $\dot{U}_1$ 的相位角.设直流侧电压为理论最小值的 k_{dc} 倍,即 $U_{dc} = k_{dc} U_{dc}^*$,输出无功电流的标幺值为

$$k_L' = \frac{1}{2} \tan\varphi \sin\left[2\varphi - 2\arccos \frac{k k_{dc} U_{dc_pu}^* \cos\varphi}{2^{1/2}}\right] \quad (5)$$

式(5)表示当直流侧电压降低时,输出电流与直流侧电压的关系.输出有功电流标幺值为

$$k_{LP} = \frac{1}{2 \cot\varphi} - \frac{1}{2 \cot\varphi} \cos\left(2\varphi - 2\arccos \frac{k k_{dc} U_{dc_pu}^* \cos\varphi}{2^{1/2}}\right) \quad (6)$$

输出电流与 δ' 的关系为

$$\delta' = \frac{1}{2} \arcsin(2k_L' \cot\varphi) \quad (7)$$

通过式(1)、式(5)和式(7),可得直流侧电压与电源功率因数之间的关系

$$\lambda = 1/\left(\left[\frac{\sin 2\delta - \sin 2\delta'}{\sin 2\delta \cot\varphi_0 - \cos 2\delta' + 1}\right]^2 + 1\right)^{1/2} \quad (8)$$

图4给出了直流侧电压与输出无功电流在不同损耗时的关系.

由图4可知,电压和电流的相位差 φ 对直流侧

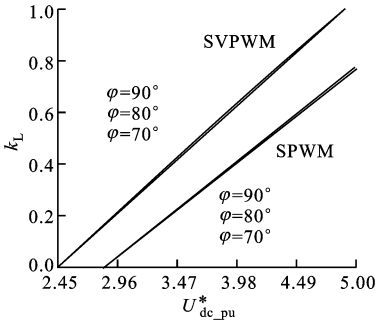


图 4 直流侧电压与输出无功电流的关系(滞后补偿)

电压与输出无功电流之间的关系影响很小,所以可以忽略 φ 的影响. 当无损耗时, φ 为 90° , 逆变器输出电压相量和电感两端电压相量方向与电源电压方向相同, 可得直流侧电压为

$$U_{dc_pu}^* = 2^{1/2}(1 + k_L)/k \tag{9}$$

直流侧电压变化量与输出电流变化量的关系为

$$\Delta U_{dc_pu} = U_{dc_pu}^* - U_{dc_pu} = \frac{2^{1/2}}{k}(k_L - k'_L) = \frac{2^{1/2}}{k}\Delta k_L \tag{10}$$

根据式(7)、式(8)和式(10), 可得电源功率因数

$$\lambda = \left(1 + \left\{\frac{\Delta U_{dc} k}{2^{1/2} k_L [\cot \varphi_0 + k_p (1 - \Delta U_{dc} k / 2^{1/2} k_L)]}\right\}^2\right)^{-1/2} \tag{11}$$

式中: k_p 为损耗的比例系数, 即输出的有功电流与无功电流的比值.

式(11)很复杂, 本文通过图形说明直流侧电压值的选取方法. 式(11)可以表示成图 5 和图 6 的形式, 通过图 5 和图 6 可以选择直流侧电压值.

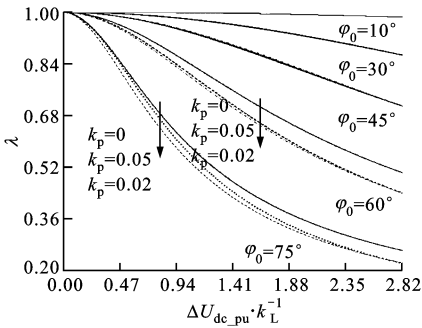


图 5 功率因数与直流侧电压关系 (SPWM)

2.2 超前补偿

当负载无功电流超前于负载电压时, SVG 是超前补偿, 相量图如图 7 所示. 利用 2.1 节中的分析方法可以得出直流侧电压理论最小值, 也可得出比理论最小值低时的直流侧电压与补偿特性间的关系.

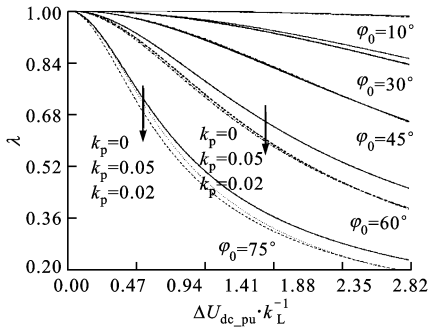


图 6 功率因数与直流侧电压关系 (SVPWM)

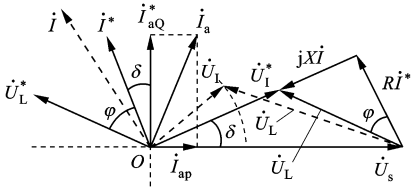


图 7 超前补偿时的相量图

当完全补偿时, 直流侧电压理论最小值为

$$U_{dc}^* = \frac{2^{1/2} U_s}{k \cos \varphi} \cos \left(\varphi + \frac{1}{2} \arcsin \frac{2 R I_{aQ}}{U_s} \right) \tag{12}$$

标么值形式为

$$U_{dc_pu}^* = \frac{2^{1/2}}{k \cos \varphi} \cos \left[\varphi + \frac{1}{2} \arcsin (2 k_L \cot \varphi) \right] \tag{13}$$

输出无功电流为

$$k'_L = \frac{1}{2} \tan \varphi \sin \left[2 \arccos \frac{k k_{dc} U_{dc_pu}^* \cos \varphi}{2^{1/2}} - 2 \varphi \right] \tag{14}$$

当直流侧电压 U_{dc} 低于理论最小值 U_{dc}^* 时, 电源功率因数与直流侧电压之间的关系与式(11)相同. 直流侧电压与输出无功电流的关系可以表示为图 8, 由图可知, 电压和电流的相位差对直流侧电压与输出无功电流之间的关系影响很小, 所以可以忽略 φ 的影响.

2.3 PWM 过调制补偿

当 PWM 调制波超过了限制的幅值时, 补偿为 PWM 过调制补偿, 基波电流的值大于功率因数为 1 时的值. 降低直流侧电压使调制波限幅, 保证了基波功率因数为 1, 但是变流器向电网注入了谐波. 当直流侧电压小于理论最小值时 $U_{dc} = k_{dc} U_{dc}^*$, 基波部分峰值为 $1/k_{dc}$. 如果三角波峰值为 1, 那么调制波为 $m = M \sin \omega t$. 保证电源基波功率因数为 1, 直流侧电压可以低于调制比为 1 时的直流侧电压, 但是输出电流中含有谐波分量. 在图 9 中, 调制波限幅, 但是基波部分大于 1, 其中 $M \sin \gamma = 1$.

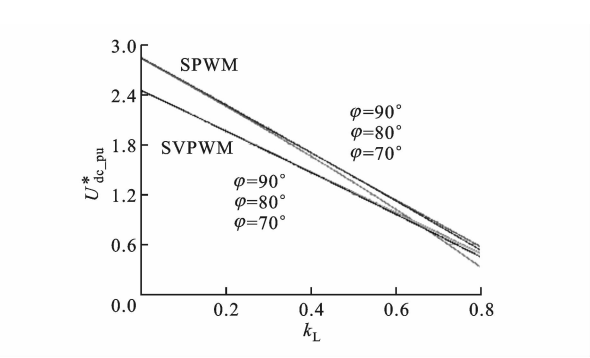


图 8 直流侧电压与输出无功电流的关系(超前补偿)

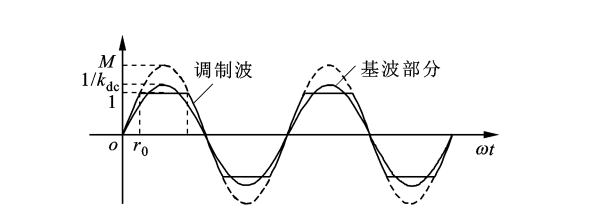


图 9 输出非正弦电流时的调制波

对调制波进行傅里叶分析,可得基波为

$$m_1 = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\gamma_0}{\sin \gamma_0} + \cos \gamma_0 \right] \sin \omega t = \frac{1}{k_{dc}} \quad (15)$$

谐波为

$$m_n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{1}{\sin \gamma_0} \left[\frac{\sin(n-1)\gamma_0}{n-1} - \frac{\sin(n+1)\gamma_0}{n+1} \right] + \frac{1}{n} 2 \cos n \gamma_0 \right\} \sin n \omega t \quad (16)$$

谐波次数是奇次,在三相三线制系统中不存在 $3z(z=1,2,3\cdots)$ 次谐波. k_{dc} 与 γ_0 的关系可以表示为

$$k_{dc} = \pi \left(\frac{2\gamma_0}{\sin \gamma_0} + 2 \cos \gamma_0 \right)^{-1} \quad (17)$$

当 $\gamma \rightarrow 0$ 时,调制波为方波,此时 k_{dc} 达到最小值.基波最小值为 $4/\pi$. 5 次到 19 次谐波总的有效值为

$$I_h = \frac{k_{dc} U_{dc}^*}{2^{1/2} \pi \omega L} \left(\sum_{n=5,7,11,13,17,19} \left\{ \frac{1}{n \sin \gamma_0} \left[\frac{\sin(n-1)\gamma_0}{n-1} - \frac{\sin(n+1)\gamma_0}{n+1} \right] + \frac{2}{n^2} \cos n \gamma_0 \right\}^2 \right)^{1/2} \quad (18)$$

式(18)可简化为

$$I_h = \frac{k_{dc} U_{dc}^*}{\omega L} f(k_{dc}) \quad (19)$$

第 n 次谐波的有效值可以表示为

$$I_n = \frac{k_{dc} U_{dc}^*}{\omega L} g(k_{dc}) \quad (20)$$

图 10 表示 $f(k_{dc})$ 与 k_{dc} 的关系,图 11 表示 $g(k_{dc})$ 与 k_{dc} 的关系.利用 k_{dc} 可得 $f(k_{dc})$ 或 $g(k_{dc})$ 的值,可得当基波功率因数为 1 时的注入电网总的谐波电流有效值.

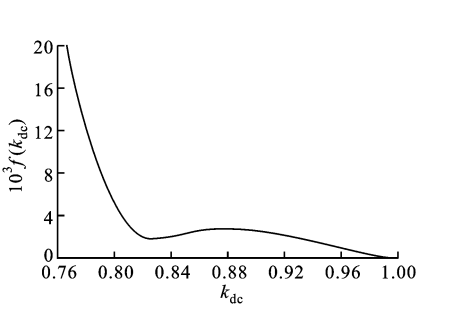


图 10 $f(k_{dc})$ 与 k_{dc} 的关系

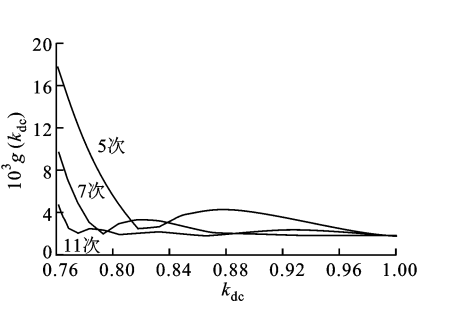


图 11 $g(k_{dc})$ 与 k_{dc} 的关系

3 实验研究

实验结果如图 12 所示,其中电源线电压有效值为 190 V,电感为 5.52 mH, $R \approx 0 \Omega$,实验中应用的调制方法是三角波 SPWM,不同的直流侧电压有不同的输出电流.在图 12 中,系统是滞后补偿,当直流侧电压为 403.5 V 时,输出电流为 19.2 A(峰值),功率因数为 1.直流侧电压理论值为 382.6 V.因为 PWM 死区的影响,实验值与理论值有一点偏差.实验验证了本文提出的设计方法和式(3)所提出的直流侧电压理论最小值的设计方法.

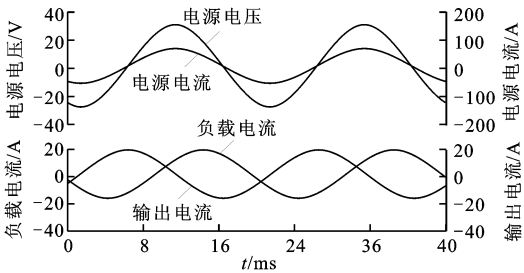


图 12 直流侧电压为理论最小值时的补偿结果

为进一步分析直流侧电压理论最小值的设计方法和低于理论最小值时的直流侧电压与补偿特性的关系,图 13~图 15 中给出一组实验结果.图 13 给出了滞后补偿时直流侧电压实验值与理论值的比较,实验值与理论值近似相等,证明了式(3)所提出的设计直流侧电压理论最小值的方法的正确性.图

14 给出了超前补偿时直流侧电压实验值与理论值的比较,实验值与理论值近似相等,证明了式(13)所提出的设计直流侧电压理论最小值的方法的正确性。补偿后电源功率因数在图 15 中给出,实验值与理论值近似相等,说明式(11)所提出的根据功率因数设计直流侧电压的方法的正确性。

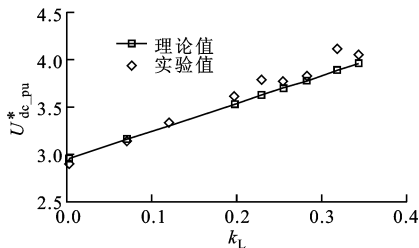


图 13 直流侧电压与输出无功电流的关系(滞后补偿)

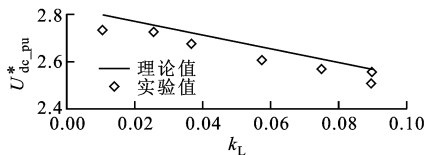


图 14 直流侧电压与输出无功电流的关系(超前补偿)

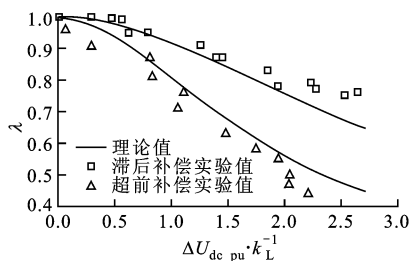


图 15 功率因数与直流侧电压的关系

4 结 论

本文分析了静止无功发生器直流侧电压取值对补偿特性的影响,得出了直流侧电压与补偿特性之间的定量关系,提出了根据电源功率因数设计直流侧电压的方法。该方法可以通过输出的无功电流得出完全补偿无功时的直流侧电压理论最小值,可以根据电源功率因数设计直流侧电压值。同时,本文定量分析了在非正弦调制方法下保证电源基波功率因

数为 1 时注入电网的谐波电流值。本文通过实验验证了直流侧电压设计方法的正确性。采用本文方法可以定量地设计静止无功发生器的直流侧电压值,减小了工程应用中设计直流侧电压的盲目性。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功补偿 [M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [2] SCHAUDER C, GERNHARDT M, STACEY E, et al. Operation of ± 100 MVar TVA STATCON [J]. IEEE Transactions Power Delivery, 1997, 12 (4): 1805-1811.
- [3] HINGORANI N G, GYUGYI L. Understanding FACTS-concepts and technology of flexible AC transmission systems [M]. New York, USA: IEEE Press, 1999: 10-13.
- [4] DE ASSIS T M L, WATANABE E H, PILOTTO L A S, et al. A new technique to control reactive power oscillations using STATCOM [C] // Proceedings of IEEE 2002 Harmonics and Quality of Power Conf. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 607-613.
- [5] SHEN Dong, LIANG Xu, HAN Yingduo. A modified per-unit STATCOM model and analysis of open loop response time [C] // Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 2624-2629.
- [6] LI Kuang, LIU Jinjun, WANG Zhao'an, et al. Static var generator control strategy for unbalanced systems in medium voltage applications [C] // Proceedings of IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 4257-4262.
- [7] 袁敞,刘进军,王晓钰,等. 一种新型串联型有源电力滤波器无谐波检测控制方法 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(2): 86-89.

YUAN Chang, LIU Jinjun, WANG Xiaoyu, et al. Novel control of series active power filter without harmonics detection [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(2): 86-89.

(编辑 杜秀杰)