

基于六脉波电压源逆变器的 SSSC 直流电容电压控制机理

丁冠军^{1,2}, 丁明¹, 汤广福²

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100085)

摘要: 对一个包含静止同步串联补偿器(SSSC)的纯感性线路的三相系统, 计算了基于六脉波电压源逆变器(VSI)的 SSSC 在感性、容性补偿方式下一周期内的交、直流侧电流及直流电容电压; 结合 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真, 全面分析了电流对直流电容充放电的影响、开关器件导通周期。计算、仿真及分析结果表明当 SSSC 注入的串联可控电压与线路电流正交时, 电容电流对电容的充放电不起作用, SSSC 与系统间仅交换无功; 当不完全正交时, 电容电流影响电容的充放电, SSSC 与系统间不仅交换无功, 亦交换有功。

关键词: 六脉波电压源逆变器; 静止同步串联补偿器; 直流电容电压控制

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)11-0001-07

0 引言

随着电力电子技术的不断发展, 柔性交流输电技术(FACTS)的使用使得系统的性能得到了很好的改善, 比如阻尼振荡、提高系统稳定性、提高系统输送容量等^[1-7]。

静止同步串联补偿器(SSSC)是基于全控器件的串联型 FACTS 装置, 它通过向线路注入一个与线路电流垂直的串联可控电压模拟电感或电容, 从而改变线路上的运行参数。在同一电感性和电容性范围内, SSSC 注入的串联可控电压与线路电流的幅值无关, 补偿范围宽^[8-11]。

SSSC 的核心部分是电压源逆变器(VSI), VSI 具有多种形式的拓扑结构, 多脉波结构的 VSI 以其自身优越的性能成为构建 SSSC 一种很好的选择方式, 主要表现在:

a. 在给定一定数量的可关断器件情形下, 多脉波变换器较多电平变换器的谐波特性要好^[12];

b. 多脉波变换器可以在基频方式下触发, 由于其低的开关频率, 可关断器件的开关损耗和发热比 PWM 调制的变换器要小;

c. 多脉波变换器的直流电容定额比多电平变换器的要低^[12], 直流电容电压利用率比多电平变换器的要高, 而且多电平变换器往往需要一个以上的直流电容。

文献[13-16]对基于多脉波 VSI 的 SSSC 有所研究, 其中文献[13]对 24 脉波的 SSSC 进行了研究,

文献[14-16]对 48 脉波的 SSSC 进行了研究, 但它们并没有对 VSI 的交、直流侧电流及电流对直流电容充放电的影响进行分析, 而这些分析又尤为重要。

现从详细分析六脉波 VSI 的特性入手, 阐述了基于六脉波 VSI 的 SSSC 在感性、容性补偿方式下的交、直流侧电流, 直流电容电压及电流对直流电容充放电影响, 进而为多脉波 SSSC 的研究奠定基础。

1 六脉波 VSI

VSI 的目的就是使用直流电压源产生交流的三相电压, 通常也被称为 DC-AC 变换器, 基本的六脉波 VSI 主电路拓扑如图 1 所示, 使用 6 个非对称的可关断器件构成三相全桥变换器结构, 可关断器件可以为 GTO、IGBT 或 IGCT 等加上反并联的续流二极管。VSI 输出的三相交流电压的频率由可关断器件的门极触发脉冲频率决定, 其幅值由直流电压源的幅值决定。使用图 1 所示的结构加之图 2 所示的门极触发脉冲即可得到如图 3 所示的输出相电压(图 3 中只给出了 u_a 的示意图, u_b 、 u_c 可分别由 u_a 移相 120° 和 240° 得到, 故省略)。

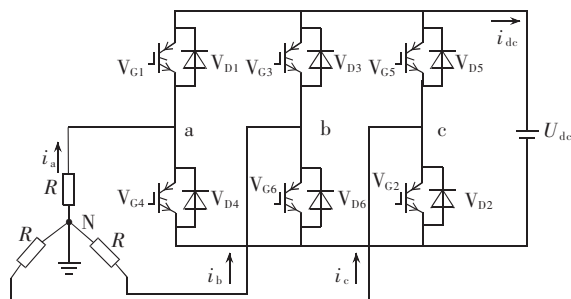


图 1 六脉波 VSI 的主电路结构

Fig.1 Main circuit of six-pulse VSI

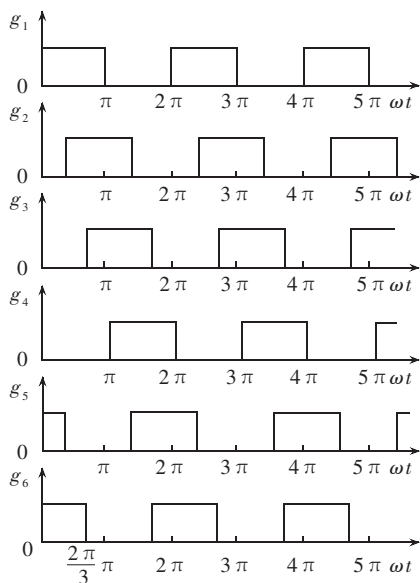
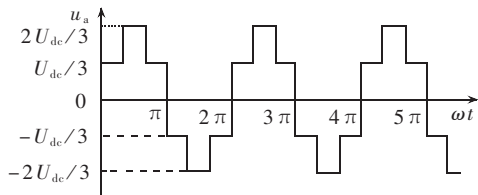


图 2 六脉波 VSI 的门极脉冲

Fig.2 Gate pulse pattern of six-pulse VSI

图 3 六脉波 VSI 相电压 u_a Fig.3 Phase voltage u_a of six-pulse VSI

$g_1 \sim g_6$ 分别为 $V_{G1} \sim V_{G6}$ 的门极触发信号,其取值只取 1 和 0 分别表示可关断器件开通和关断,从图 2 可以看出,脉冲宽度均为 180° ,各脉冲相位互差 60° 。从图 3 可以看出,输出相电压 u_a 奇对称,运用傅里叶分析,可得出 u_a 的表达式为

$$u_a = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2U_{dc}}{3n\pi} [1 - (-1)^n] \times [1 + \cos(n\pi/3)] \sin n\omega t \quad (1)$$

故而可以得到 u_a 基波和高次谐波的幅度峰值 (peak) 和有效值 (RMS) 分别为

$$u_{a1} = \frac{2}{\pi} U_{dc} (\text{peak}), u_{a1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{dc} (\text{RMS}) \quad (2)$$

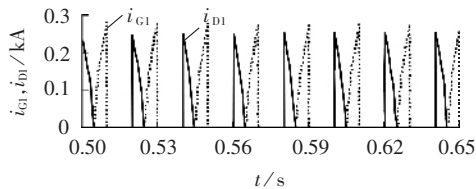
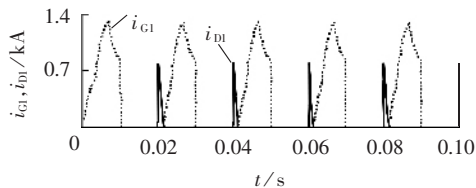
$$u_{an} = \frac{2}{\pi n} U_{dc} (\text{peak}), u_{an} = \frac{\sqrt{2}}{\pi n} U_{dc} (\text{RMS}) \quad (3)$$

其中, $n=6k \pm 1, k=1, 2, \dots$ 。如图 1 所示结构,下面分析开关器件的导通情况,以第 1 组器件为例, V_{D1} 在区间 $[0^\circ, \theta]$ 内导通, V_{G1} 在区间 $[\theta, 180^\circ]$ 内导通 (图 4 为在 PSCAD/EMTDC 中仿真得到):

a. 当为纯电阻负载 (即功率因数 $\lambda=1$) 时, $\theta=0^\circ$, 即此时只有 V_{G1} 导通;

b. 当为纯电感负载 (即 $\lambda=0$) 时, $\theta=90^\circ$, 即此时 V_{G1}, V_{D1} 各导通 90° 区间, 如图 4(a) 所示;

c. 当感性功率因数在 0 和 1 之间时, $0 < \theta < 90^\circ$, 如当 $\lambda=0.866$ 时, $\theta=30^\circ$, 如图 4(b) 所示。

(a) $\lambda=0, \theta=90^\circ$ (b) $\lambda=0.866, \theta=30^\circ$ 图 4 V_{G1} 和 V_{D1} 的导通周期Fig.4 Conduction period of V_{G1} and V_{D1}

2 SSSC 特性分析 (仅交换无功时)

SSSC 通过向线路注入一个与线路电流垂直的串联可控电压模拟电感或电容,从而改变线路上的运行参数。注入的串联可控电压的幅值与线路电流的幅值无关,当其相位超前线路电流 90° 时,注入电压与线路上的感性压降具有相同的相位,使得整体的感性压降增加,故而线路电流减小,受端功率也变小,此时 SSSC 称为感性补偿模式;当注入电压相位滞后线路电流 90° 时,其相位与线路上的感性压降相反,使得整体的感性压降减小,故而线路电流增加,受端功率也增加,此时 SSSC 称为容性补偿模式。

以上为 SSSC 的基本运行原则。传输线的阻抗有电阻性成分和电感性成分,其中电感性成分占主导,SSSC 注入串联可控电压也是通过调节线路感性成分发挥其作用的。下面通过一个纯感性线路的三相系统分析 SSSC 的特性,如图 5 所示 (为单线示意图),包括其交、直流侧电流,直流电容电压以及电流对直流电容充放电的影响等。采用直流电容替代图 1 所示的六脉波 VSI 中的直流电压源,这样可调节直流电压幅值。通过变比为 1:1 的耦合变压器将 VSI 接入系统,耦合变压器绕组采用星形接法,交流系统电压 $u=U_m \sin \omega t$, u_{SSSC} 为 SSSC 的可控串联注入电压。

在如图 5 所示的纯感性线路中,线路电流相位是滞后电压 u 90° 的,SSSC 处于感性和容性补偿方式时的电压、电流矢量图及一周期内 u 与 SSSC a 相电压 u_a 分别如图 6(a) 和 (b) 所示。

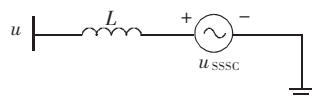


图 5 SSSC 接入感性线路单线示意图

Fig.5 An inductive line with SSSC

2.1 交流侧电流

从图 5 可知,暂态电感电压 $u_L(t) = L di/dt = u - u_{SSSC}$, 又如图 6(b) 所示,补偿电压 u_a 每隔 60° 的导通周期进行变化,故而可在区间 $[0, \pi]$ 内划分 3 段对线路电流 i_a 进行分析 (由于 $[\pi, 2\pi]$ 内 i_a 的波形可由 $[0, \pi]$ 内取反得到,故略之; i_b, i_c 可由 i_a 分别

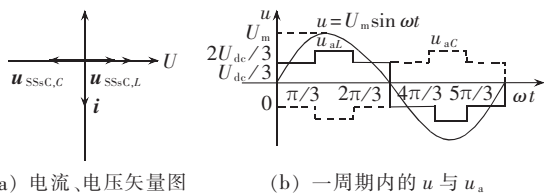


图 6 SSSC 感性、容性补偿时的电压、电流示意图

Fig.6 Voltages and currents of SSSC under inductive and capacitive compensation modes

移相 120° 、 240° 得到,也略之)。

a. 当 $0 \leq \omega t \leq \pi/3$ 时:

$$L \frac{di_a(t)}{dt} = U_m \sin \omega t - (-1)^s \frac{U_{dc}}{3} \Rightarrow$$

$$i_a(t) = \int_0^t \frac{U_m}{L} \sin \omega t dt - \int_0^t (-1)^s \frac{U_{dc}}{3L} dt + I_0 \Rightarrow$$

$$i_a(t) = \frac{U_m}{\omega L} (1 - \cos \omega t) - (-1)^s \frac{U_{dc}}{3L} t + I_0$$

其中 I_0 为初值, $I_0 = i_a(0)$; s 为标记符号(以下 s 意义相同), 当 SSSC 处于感性模式时, $s=0$; 当 SSSC 处于容性模式时, $s=1$ 。

b. 当 $\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3$ 时:

$$L \frac{di_a(t)}{dt} = U_m \sin \omega t - (-1)^s \frac{2U_{dc}}{3} \Rightarrow$$

$$i_a(t) = \int_{\pi/3\omega}^t \frac{U_m}{L} \sin \omega t dt - \int_{\pi/3\omega}^t (-1)^s \frac{2U_{dc}}{3L} dt + I_1 \Rightarrow$$

$$i_a(t) = \frac{U_m}{\omega L} \left(\frac{1}{2} - \cos \omega t \right) - (-1)^s \frac{2U_{dc}}{3L} \left(t - \frac{\pi}{3\omega} \right) + I_1$$

其中 $I_1 = i_a[\pi/(3\omega)]$ 。

c. 当 $2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi$ 时:

$$L \frac{di_a(t)}{dt} = U_m \sin \omega t - (-1)^s \frac{U_{dc}}{3} \Rightarrow$$

$$i_a(t) = \int_{\frac{2\pi}{3\omega}}^t \frac{U_m}{L} \sin \omega t dt - \int_{\frac{2\pi}{3\omega}}^t (-1)^s \frac{U_{dc}}{3L} dt + I_2 \Rightarrow$$

$$i_a(t) = \frac{U_m}{\omega L} \left(-\frac{1}{2} - \cos \omega t \right) - (-1)^s \frac{U_{dc}}{3L} \left(t - \frac{2\pi}{3\omega} \right) + I_2$$

其中 $I_2 = i_a[2\pi/(3\omega)]$ 。

由于稳态时, $i_a(t)$ 的波形是对称的, 此时有

$$i_a\left(\frac{\pi}{2\omega}\right) = 0, \text{ 故可得出:}$$

$$I_1 = (-1)^s \frac{\pi}{9\omega L} U_{dc} - \frac{U_m}{2\omega L}$$

$$I_2 = (-1)^{s+1} \frac{\pi}{9\omega L} U_{dc} + \frac{U_m}{2\omega L}$$

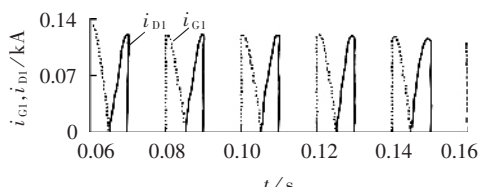
$$I_0 = (-1)^s \frac{2\pi}{9\omega L} U_{dc} - \frac{U_m}{\omega L}$$

$$i_a(t) = \begin{cases} A - (-1)^s \left(\frac{t}{3L} - \frac{2\pi}{9\omega L} \right) U_{dc} & 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3} \\ A - (-1)^s \left(\frac{2t}{3L} - \frac{\pi}{3\omega L} \right) U_{dc} & \frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3} \\ A - (-1)^s \left(\frac{t}{3L} - \frac{\pi}{9\omega L} \right) U_{dc} & \frac{2\pi}{3} \leq \omega t \leq \pi \end{cases} \quad (4)$$

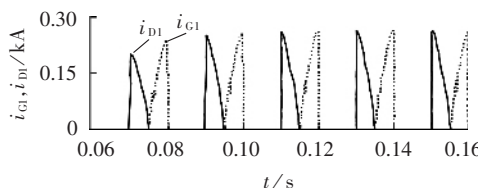
$$A = -\frac{U_m}{\omega L} \cos \omega t$$

2.2 开关器件导通周期

规定交流侧电流正方向如图 1 中所示, 当各开关器件门极触发时, 对于 VSI 上半桥臂的器件: 交流电流为正时, 二极管导通; 交流电流为负时, 可关断器件导通; 下半桥臂的情况正好相反。如触发脉冲 g_1 开通时, 若 $i_a(t)$ 为正, 则 V_{D1} 导通; 若 $i_a(t)$ 为负, 则 V_{G1} 导通; 如触发脉冲 g_4 开通时, 若 $i_a(t)$ 为正, 则 V_{G4} 导通; 若 $i_a(t)$ 为负, 则 V_{D4} 导通。如前所述, 当感性功率因数为 0 时, 可关断器件与二极管各导通 90° , 由式 (4) 不难得知: 当 SSSC 感性补偿时, 可关断器件在交流侧电流为 0 时关断, 当 SSSC 容性补偿时, 可关断器件在交流侧电流为峰值时关断, 在 PSCAD/EMTDC 中仿真得出了 V_{G1} 和 V_{D1} 的导通情况, 如图 7 所示。



(a) SSSC 感性补偿



(b) SSSC 容性补偿

图 7 V_{G1} 和 V_{D1} 的导通周期Fig.7 Conduction periods of V_{G1} and V_{D1}

2.3 直流电容电流

直流电容电流 $i_{dc}(t)$ 可由下式推导:

$$i_{D1}(t) + i_{D3}(t) + i_{D5}(t) + i_{dc}(t) = i_{G1}(t) + i_{G3}(t) + i_{G5}(t) \Rightarrow$$

$$i_{dc}(t) = [i_{G1}(t) - i_{D1}(t)] + [i_{G3}(t) - i_{D3}(t)] + [i_{G5}(t) - i_{D5}(t)]$$

可见 $i_{dc}(t)$ 取决于开关器件的导通情况, 由 $i_a(t)$ 、 $i_b(t)$ 、 $i_c(t)$ 中的若干组成, 每隔 60° 变化, 对于 SSSC 感性补偿时 $i_{dc}(t)$ 的具体分析如下 (SSSC 容性补偿时 $i_{dc}(t)$ 的分析可由感性补偿时移相 180° 得到):

a. 当 $0 \leq \omega t < \pi/3$ 时, 从图 2 可以看出, V_{G1} 、 V_{G5} 、 V_{G6} 有脉冲, 故而 $i_{dc}(t) = i_a(t) + i_c(t)$, 此时

$$i_c(t) = -\frac{U_m}{\omega L} \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) - \left(\frac{1}{3L} t + \frac{\pi}{9\omega L} \right) U_{dc}$$

b. 当 $\pi/3 \leq \omega t < 2\pi/3$ 时, V_{G1} 、 V_{G2} 、 V_{G6} 有脉冲, 故而 $i_{dc}(t) = i_a(t)$;

c. 当 $2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi$ 时, V_{G1} 、 V_{G2} 、 V_{G3} 有脉冲, 故而 $i_{dc}(t) = i_a(t) + i_b(t)$, 此时

$$i_b(t) = -\frac{U_m}{\omega L} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \left(\frac{t}{3L} - \frac{4\pi}{9\omega L} \right) U_{dc}$$

综上有

$$i_{dc}(t) = \begin{cases} B - \left(\frac{2t}{3L} - \frac{\pi}{9\omega L} \right) U_{dc} & 0 \leq \omega t < \frac{\pi}{3} \\ C - \left(\frac{2t}{3L} - \frac{\pi}{3\omega L} \right) U_{dc} & \frac{\pi}{3} \leq \omega t < \frac{2\pi}{3} \\ D - \left(\frac{2t}{3L} - \frac{5\pi}{9\omega L} \right) U_{dc} & \frac{2\pi}{3} \leq \omega t \leq \pi \end{cases} \quad (5)$$

$$B = (-1)^s \frac{U_m}{\omega L} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right)$$

$$C = (-1)^s \frac{U_m}{\omega L} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$D = (-1)^{s+1} \frac{U_m}{\omega L} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right)$$

通过简单分析,可看出在 3 段区间中 $i_{dc}(t)$ 的值是一样的,区别仅在于有 60° 的相移,对于 $[\pi, 2\pi]$ 也是如此,故而 $i_{dc}(t)$ 的频率是交流系统频率的 6 倍。取系统参数 $U_m = 220\sqrt{2}$ V, $L = 6$ mH, $f = 50$ Hz, $U_{dc} = 50$ V, 图 8 为 SSSC 感性、容性补偿时 $i_{dc}(t)$ 的波形,其中图 (a) (c) 由式 (5) 得到, (b) (d) 由 PSCAD / EMTDC 仿真得到。

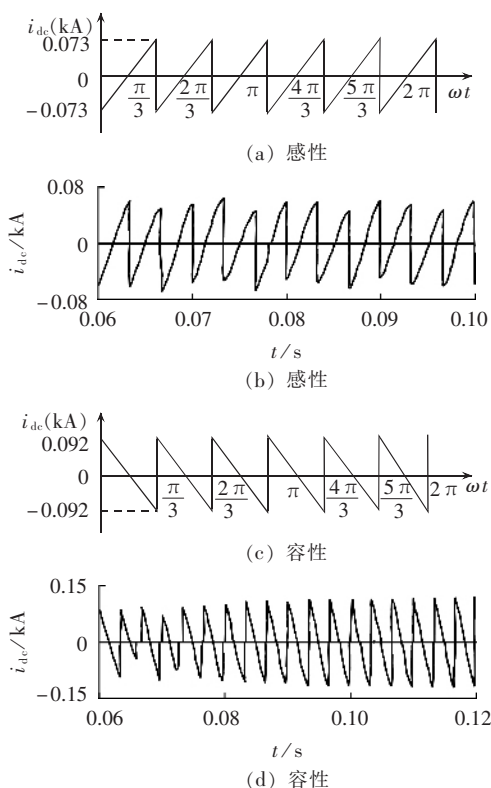


图 8 SSSC 感性、容性补偿时的电容电流 $i_{dc}(t)$

Fig.8 Capacitor current $i_{dc}(t)$ of SSSC under inductive and capacitive compensation modes

2.4 直流电容电压

假定不考虑 SSSC 的损耗,起初直流电容被充电, $i_{dc}(t)$ 维持在式 (5) 的限定范围之内,则直流电压 $u_{dc}(t)$ 可以由下式得出:

$$u_{dc}(t) = \frac{1}{C} \int i_{dc}(t) dt + U_0 \quad (6)$$

其中 $U_0 = u_{dc}(0)$, 代入 $i_{dc}(t)$ 则可计算出 $u_{dc}(t)$, 并可得出最小的直流电压脉动,同时可看出 $u_{dc}(t)$ 也可

以 60° 为周期变化,具体分析第 1 个 60° 区间 ($0 \leq \omega t \leq \pi/3$) 内的 $u_{dc}(t)$ 如下:

$$u_{dc}(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_{dc}(t) dt + U_0 \quad t \in [0, T]$$

$T = \pi/(3\omega)$, 将 $i_{dc}(t)$ 在 $0 \leq \omega t \leq \pi/3$ 内的表达式代入可得:

$$u_{dc}(t) = (-1)^s \frac{U_m}{\omega^2 LC} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} - \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) \right] - \frac{U_{dc}}{3LC} t^2 + \frac{\pi}{9\omega LC} U_{dc} t + U_0$$

又因为 $U_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{dc}(t) dt$, 所以得出:

$$U_0 = (-1)^s 0.089 \frac{U_m}{\omega^2 LC} - 0.06097 \frac{U_{dc}}{\omega^2 LC} + U_{dc}$$

$$u_{dc}(t) = (-1)^s \frac{U_m}{\omega^2 LC} \left[0.955 - \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) \right] - \frac{U_{dc}}{3LC} t^2 + \frac{\pi}{9\omega LC} U_{dc} t - 0.06097 \frac{U_{dc}}{\omega^2 LC} + U_{dc} \quad (7)$$

由 $u_{dc}(t)$ 和 $i_{dc}(t)$ 的关系可知,当 $i_{dc}(t)$ 为 0 时, $u_{dc}(t)$ 存在极值 U_{pk} , 故

$$U_{pk} = u_{dc} \left(\frac{\pi}{6\omega} \right) = (-1)^{s+1} 0.045 \frac{U_m}{\omega^2 LC} + 0.0304 \times \frac{U_{dc}}{\omega^2 LC} + U_{dc} \quad (8)$$

SSSC 感性补偿时, U_{pk} 为极小值; SSSC 容性补偿时, U_{pk} 为极大值; 那么值得关注的有 2 个量, 即感性补偿时的 U_0 (记做 U_{0L}) 和容性补偿时的 U_{pk} (记做 U_{pkC}), 取 U_{0L} 和 U_{pkC} 两者中较大的值, 记为 U_{max} , 即 $U_{max} = \max(U_{0L}, U_{pkC})$, 比较 U_{0L} 和 U_{pkC} , 可知, 当 $U_{dc} \leq 0.482 U_m$ 时, $U_{max} = U_{0L}$, 当 $U_{dc} \geq 0.482 U_m$ 时, $U_{max} = U_{pkC}$ 。 U_{max} 对于可关断器件极为重要, 因为可关断器件直接承受的就是电容电压, 因此必须确保可关断器件承受得住 U_{max} , 这也是 SSSC 选取可关断器件的依据之一。取系统参数 $U_m = 220\sqrt{2}$ V, $L = 6$ mH, $C = 500 \mu F$, $f = 50$ Hz, $U_{dc} = 50$ V, 图 9 为 SSSC 感性、容性补偿时 $u_{dc}(t)$ 的波形, 其中 (a) (c) 由式 (7) 得到, (b) (d) 由 PSCAD / EMTDC 仿真得到。

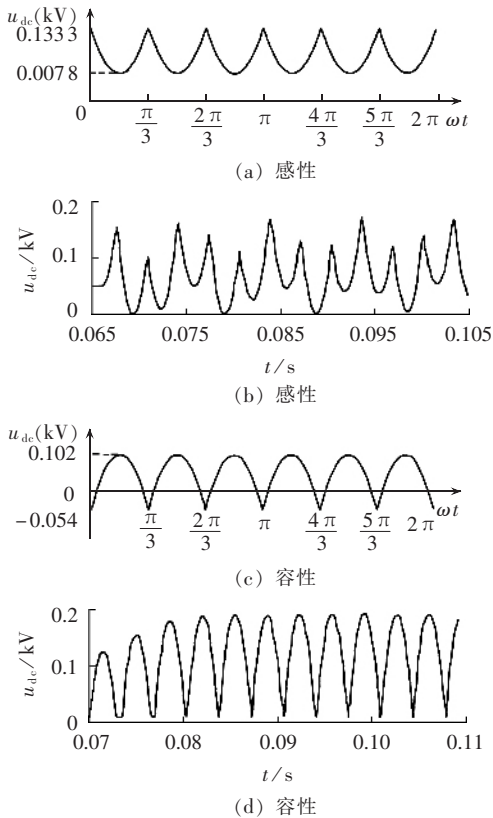
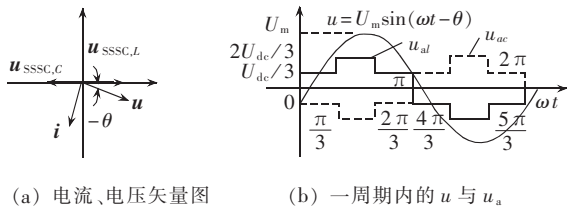
由式 (5) 和图 8 不难看出, 电容电流的平均值为 0, 又由式 (6) 可得出结论: 不管 SSSC 提供何种补偿方式, 电容电流对于电容的充电并不起作用, 换言之, 当 SSSC 注入的串联可控电压 u_{SSSC} 与线路电流 i 正交时, SSSC 与系统仅交换无功。若 u_{SSSC} 与 i 不完全正交, 则情况就有所不同, 下面将对此加以分析。

3 同时交换无功、有功时 SSSC 特性分析

考虑 u 有相移, 即 $u = U_m \sin(\omega t - \theta)$, 此时 SSSC 处于感性、容性补偿方式时的电压、电流矢量图以及一周内 u 与 SSSC A 相电压 u_a 如图 10 (a) 和 (b) 所示。

3.1 交流侧电流

与 2.1 节类似, 同样也是将 $[0, \pi]$ 划为 3 段对

图9 SSSC感性、容性补偿时的电容电压 $u_{dc}(t)$ Fig.9 Capacitor voltage $u_{dc}(t)$ of SSSC under inductive and capacitive compensation modes图10 $\theta > 0$, SSSC感性、容性补偿时的电压、电流示意图Fig.10 Voltages and currents of SSSC under inductive and capacitive compensation modes with $\theta > 0$

$i_a(t)$ 进行分析,此时的边界条件为 $i_a(0) = -i_a(\pi/\omega)$, 利用此条件可分别计算出 I_0, I_1 和 I_2 , 故得出:

$$i_a(t) = \begin{cases} E - (-1)^s \left(\frac{t}{3L} - \frac{2\pi}{9\omega L} \right) U_{dc} & 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3} \\ E - (-1)^s \left(\frac{2t}{3L} - \frac{\pi}{3\omega L} \right) U_{dc} & \frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3} \\ E - (-1)^s \left(\frac{t}{3L} - \frac{\pi}{9\omega L} \right) U_{dc} & \frac{2\pi}{3} \leq \omega t \leq \pi \end{cases} \quad (9)$$

$$E = -\frac{U_m}{\omega L} \cos(\omega t - \theta)$$

3.2 直流电容电流与直流电容电压

与2.3分析类似,得出:

$$i_{dc}(t) = \begin{cases} F - \left(\frac{2t}{3L} - \frac{\pi}{9\omega L} \right) U_{dc} & 0 \leq \omega t < \frac{\pi}{3} \\ G - \left(\frac{2t}{3L} - \frac{\pi}{3\omega L} \right) U_{dc} & \frac{\pi}{3} \leq \omega t < \frac{2\pi}{3} \\ H - \left(\frac{2t}{3L} - \frac{5\pi}{9\omega L} \right) U_{dc} & \frac{2\pi}{3} \leq \omega t \leq \pi \end{cases} \quad (10)$$

$$F = (-1)^s \frac{U_m}{\omega L} \sin \left(\omega t - \theta - \frac{\pi}{6} \right)$$

$$G = (-1)^s \frac{U_m}{\omega L} \sin \left(\omega t - \theta - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$H = (-1)^{s+1} \frac{U_m}{\omega L} \sin \left(\omega t - \theta + \frac{\pi}{6} \right)$$

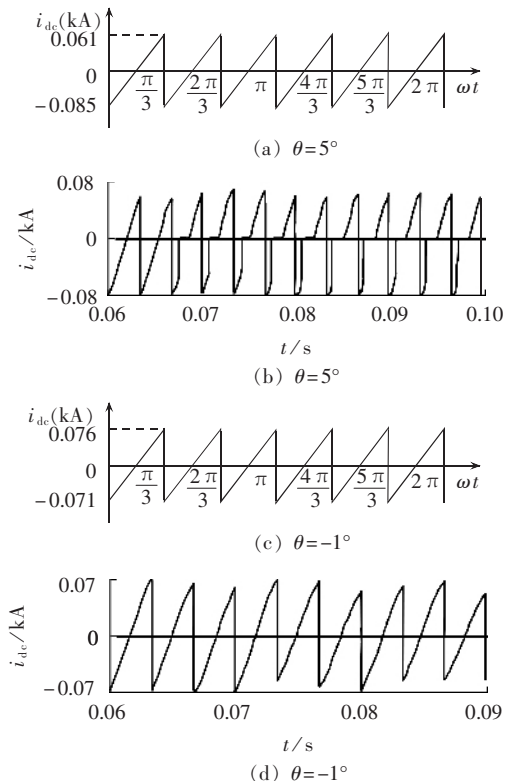
仍用前述的系统参数,图11为SSSC感性补偿、 θ 分别取 5° 和 -1° 时 $i_{dc}(t)$ 波形;图12为SSSC容性补偿、 θ 分别取 5° 和 -5° 时 $i_{dc}(t)$ 波形,其中(a)(c)由式(10)得到,(b)(d)由PSCAD/EMTDC仿真得到。

由图10(a)所示的矢量图、式(10)及图11、12进行综合分析,可知以下几点。

a. θ 为正值时,SSSC感性补偿的串联注入可控电压 u_{SSC} 与线路电流 i 的夹角大于 90° , $i_{dc}(t)$ 具有负的平均值,由式(6)可知电容放电,电容电压减小;SSSC容性补偿的 u_{SSC} 与 i 的夹角小于 90° , $i_{dc}(t)$ 具有正的平均值,又由式(6)可知电容充电,电容电压增大。

b. θ 为负值时,SSSC感性补偿的串联注入可控电压 u_{SSC} 与线路电流 i 的夹角小于 90° , $i_{dc}(t)$ 具有正的平均值,又由式(6)可知电容充电,电容电压增大;SSSC容性补偿的 u_{SSC} 与 i 的夹角大于 90° , $i_{dc}(t)$ 具有负的平均值,又由式(6)可知电容放电,电容电压减小。仍取前述系统参数,图13示意出了 θ 取相应值时电容电压的变化情况。

c. SSSC感性补偿时,若串联注入可控电压 u_{SSC} 超前线路电流 i 90° ,则SSSC相当于一个电抗,仅吸

图11 SSSC感性补偿, θ 分别取 5° 、 -1° 时的 $i_{dc}(t)$ Fig.11 Capacitor current $i_{dc}(t)$ of SSSC under inductive compensation mode with $\theta = 5^\circ$ and -1°

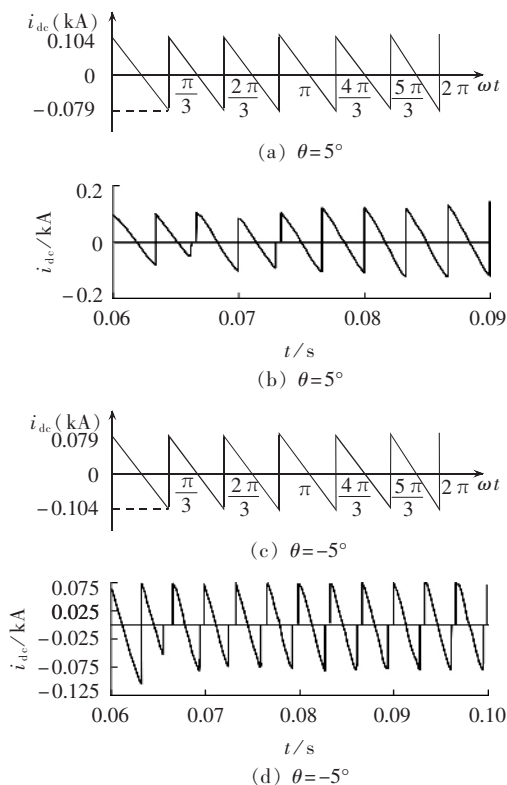


图 12 SSSC 容性补偿, θ 分别取 5° 、 -5° 时的 $i_{dc}(t)$

Fig.12 Capacitor current $i_{dc}(t)$ of SSSC under capacitive compensation mode with $\theta=5^\circ$ and -5°

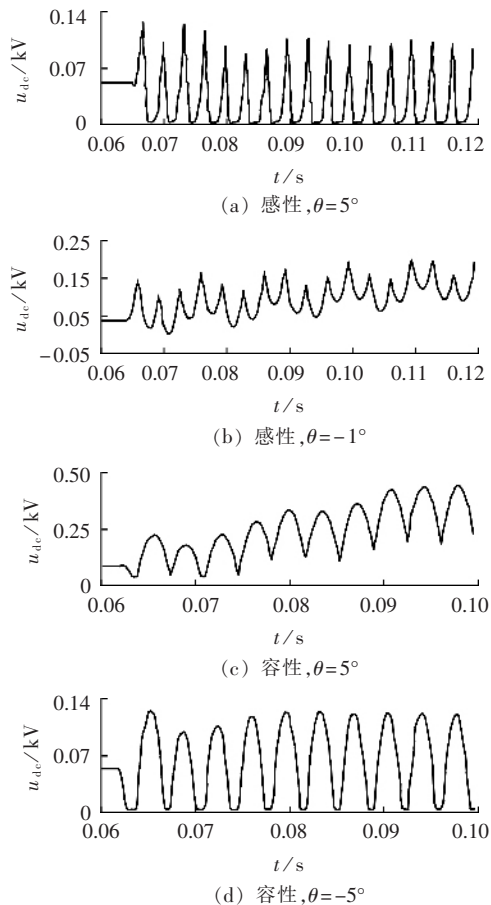


图 13 θ 取相应值时的 SSSC 直流电容电压 $u_{dc}(t)$

Fig.13 Capacitor voltage $u_{dc}(t)$ of SSSC under inductive and capacitive compensation modes with relevant θ

收无功;若 u_{SSSC} 超前 i 介于 $0^\circ \sim 90^\circ$, 则 SSSC 相当于一个感抗, 不仅吸收无功, 且吸收有功;若 u_{SSSC} 超前 i 大于 90° , 则 SSSC 不仅吸收无功, 且发出有功。

d. SSSC 容性补偿时, 若串联注入可控电压 u_{SSSC} 滞后线路电流 i 90° , 则 SSSC 相当于一个电容, 仅发出无功;若 u_{SSSC} 滞后 i 介于 $0^\circ \sim 90^\circ$, 则 SSSC 相当于一个容抗, 不仅发出无功, 且吸收有功;若 u_{SSSC} 超前 i 大于 90° , 则 SSSC 不仅发出无功, 且发出有功。

4 结论

SSSC 的补偿度与注入电压的幅值成正比, 而注入电压又与直流电容电压成正比, 因此, 可以通过电容的充放电改变电容电压值, 从而有效地调节补偿度, 运用前述的分析可以很容易地实现电容的充放电。另外, 在实际电路中, 可关断器件及变压器并非理想状态, SSSC 还是有一定损耗的, 可以通过将注入电压偏离线路电流正交方向一定的角度, 使得电容电流具有正的平均值, 从而补偿损耗, 维持电容电压在所期望的值。

详细分析了基于六脉波 VSI 的 SSSC 在感性、容性补偿方式下的交、直流侧电流, 直流电容电压以及电流对直流电容充放电的影响, 揭示了多脉波 SSSC 电容电压控制的本质, 为多脉波 SSSC 的研究奠定基础, 同时其分析方法也可以引申到基于多脉波 VSI 结构的其它 FACTS 装置^[17-18]中去, 如静止同步补偿器 (STATCOM)、统一潮流控制器 (UPFC)。

参考文献:

- [1] 何大愚. 柔性交流输电系统技术的发展要求其定义更新[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(10): 79-82.
HE Da-yu. Development of flexible AC transmission & distribution system technology requires definition renewing [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(10): 79-82.
- [2] 王宝华, 杨成梧. FACTS 稳定控制策略综述[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(2): 50-53.
WANG Bao-hua, YANG Cheng-wu. A summary of stability control in FACTS [J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(2): 50-53.
- [3] 孙元章, 曹明. FACTS 对多机系统静态电压稳定性的影响[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(1): 6-10.
SUN Yuan-zhang, CAO Ming. Effect of FACTS on static voltage stability of multi-machine power systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(1): 6-10.
- [4] 彭飞进, 陈金富, 戴堂云. FACTS 元件的动态特性分析[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(5): 11-14.
PENG Fei-jin, CHEN Jin-fu, DAI Tang-yun. Dynamic performance analysis of FACTS devices [J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(5): 11-14.
- [5] 高俊, 丁洪发. 典型 FACTS 元件抑制次同步谐振研究综述[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(5): 45-50.
GAO Jun, DING Hong-fa. A summary of SSR mitigation using typical FACTS devices [J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(5): 45-50.
- [6] HINGORANI N G. High power electronics and flexible AC transmission system [J]. IEEE Power Engineering Review, 1988, 8

- (7):3-4.
- [7] HINGORANI N G,GYUGYI L. Understanding FACTS:concepts and technology of flexible AC transmission systems [M]. New York:IEEE Press,2000.
- [8] 汪普林. 静止同步串联补偿器的应用分析[J]. 南华大学学报:理工版,2002,16(3):21-24.
- WANG Pu-lin. The analysis and application of static synchronous series compensator[J]. Journal of Nanhua University: Science & Engineering Edition,2002,16(3):21-24.
- [9] 周俊宇. 静止同步串联补偿器在电力系统中的应用[J]. 广东电力,2005,18(12):15-18.
- ZHOU Jun-yu. Static synchronous series compensators applied in power system[J]. Guangdong Electric Power,2005,18(12):15-18.
- [10] 郭剑波,武守远,荆平,等. 提高电网输送能力的技术措施[J]. 电力设备,2005,6(10):4-7.
- GUO Jian-bo,WU Shou-yuan,JING Ping,et al. Technical measures for improving transmission ability of power network [J]. Electrical Equipment,2005,6(10):4-7.
- [11] GYUGYI L,SCHAUDER C D,SEN K. Static synchronous series compensator:a solid-state approach to the series compensation of transmission lines[J]. IEEE Trans Power Delivery,1997,12(1):406-417.
- [12] SOTO D,GREEN T C. A comparison of high-power converter topologies for the implementation of FACTS controllers [J]. IEEE Trans Industrial Electronics,2002,49(5):1072-1080.
- [13] SEN K K. SSSC—static synchronous series compensator;theory, modeling, and applications [J]. IEEE Trans Power Delivery,1998,13(1):241-246.
- [14] KUMAR L S,GHOSH A. Modeling and control design of a static synchronous series compensator[J]. IEEE Trans Power Delivery,1999,14(4):1448-1453.
- [15] 王庆红,胡国根. 一种基于 48 脉波电压源逆变器的静止同步串联补偿器及其控制系统的设计与建模(上)[J]. 电力系统及其自动化学报,2001,13(2):54-57.
- WANG Qing-hong,HU Guo-gen. Modeling and control design of a 48-step inverter based static synchronous series compensator[J]. Proceedings of the EPSA,2001,13(2):54-57.
- [16] 张颖,胡国根. 一种基于 48 脉波电压源逆变器的静止同步串联补偿器及其控制系统的设计与建模(下)[J]. 电力系统及其自动化学报,2001,13(4):39-42.
- ZHANG Ying,HU Guo-gen. Modeling and control design of a 48-step inverter based static synchronous series compensator [J]. Proceedings of the EPSA,2001,13(4):39-42.
- [17] 欧开健. STATCOM 直流侧电容值对系统谐波含量和电容电压波动幅值的影响及其选择[J]. 电力自动化设备,2004,24(6):6-9.
- OU Kai-jian. Effect of STATCOM DC Capacitor on harmonic distortion and voltage fluctuation [J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(6):6-9.
- [18] 吴捷,王建. 含 UPEC 的灵活交流输电系统最优潮流控制[J]. 电力自动化设备,2001,21(3):1-3.
- WU Jie,WANG Jian. Optimal power flow control of flexible AC transmission system with UPF[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(3):1-3.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:



丁冠军

丁冠军(1982-),男,安徽合肥人,博士研究生,研究方向为 FACTS 技术及电力系统领域中 VSC 共性技术(E-mail:dinggj@epri.ac.cn);

丁明(1956-),男,安徽合肥人,院长,博士研究生导师,研究方向为电力系统规划及可靠性、新能源及其利用、FACTS 仿真与控制等;

汤广福(1966-),男,安徽滁州人,教授级高级工程师,所长,博士,长期从事 FACTS 和 HVDC 的开发及其相关试验方法的研究。

Mechanism of DC capacitor voltage control of 6-pulse VSI-based SSSC

DING Guan-jun^{1,2}, DING Ming¹, TANG Guang-fu²

(1. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: For a three-phase power system of inductive lines with SSSC(Static Synchronous Series Compensator),the AC and DC currents in one period,as well as the DC capacitor voltage,of the SSSC based on six-pulse VSI(Voltage Sourced Inverter) are calculated for both inductive and capacitive compensation modes. Combined with PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation,the impact of currents on the charging and discharging of DC capacitor and the conductive period of its switching devices are analyzed. The calculative,simulative and analytic results show that,when the controllable serial voltage injected by SSSC is perpendicular to line current,the capacitor current has no effect on the charging and discharging of capacitor,and there is only reactive power exchange between SSSC and system;when the controllable serial voltage injected by SSSC is incompletely perpendicular to line current,the capacitor current has effect on the charging and discharging of capacitor,and there are both reactive and active power exchanges between SSSC and system.

This project is supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2004CB217907).

Key words: six-pulse VSI; SSSC; DC capacitor voltage control