

静止同步串联补偿器抑制次同步谐振研究

宁改娣, 何世杰, 王跃, 孙国平, 王兆安

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对静止同步串联补偿器(SSSC)常电抗模式下可能引起次同步谐振(SSR)的问题,提出了一种新的SSSC控制模式——电感模式.该控制模式补偿指令为电感,且可正可负,补偿的电抗与线路电抗随次同步频率同比例线性变化.理论和仿真对比分析了次同步频率范围内电感模式和常电抗模式的阻抗特性,证明了电感模式下SSSC不会与线路感抗发生谐振,有效提高线路阻抗,明显抑制次同步电流,消除了系统产生SSR的可能性.

关键词: 补偿器;次同步谐振;常电抗模式;电感模式

中图分类号: TM712;TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)02-0189-05

Static Synchronous Series Compensator in Damping Subsynchronous Resonance

NING Gaidi, HE Shijie, WANG Yue, SUN Guoping, WANG Zhao'an

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The fact that static synchronous series compensator (SSSC) in the constant reactance mode often potentially excite subsynchronous resonance (SSR) motivates to design a novel inductance mode, where the compensation of SSSC in inductance mode and the transmission line impedance are in the same proportion to subsynchronous frequency. A comparison between impedance characteristics of inductance mode and ones of constant reactance mode is made with theoretical analysis and simulation. It is verified that the novel inductance mode is immune to SSR as subsynchronous excitation voltage exists.

Keywords: compensator; subsynchronous resonance; constant reactance mode; inductance mode

静止同步串联补偿器(SSSC)是一种串联型FACTS装置,具有与输电线路交换有功和无功的能力.文献[1-3]介绍了SSSC的基本原理、特性以及潜在优势. SSSC对次同步谐振的影响多种文献有不同结论出现,文献[1-5]都以不同理由说明SSSC不会像电容补偿一样引起次同步谐振.文献[6-7]论述了在目前的控制策略下,SSSC使线路阻抗具有与传统固定电容补偿类似的谐振点,说明了SSSC有引起次同步谐振的潜在可能性.

本文分析得到了包含SSSC控制策略影响的系统频域特性,利用该特性分析与仿真了SSSC常电抗模式的线路阻抗特性,论述了该控制策略有引起

SSR的可能性.采用同样的分析方法,得到本文提出的电感模式的线路阻抗特性.对比分析了次同步频率范围(10~60 Hz)内常电抗模式和电感模式的阻抗特性,证明了电感模式能有效抑制次同步谐振的发生.理论分析与仿真研究的结论一致.

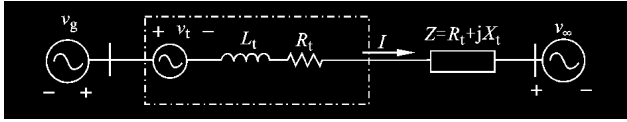
1 SSSC 数学模型

具有SSSC补偿的单机无穷大系统的单相等效电路如图1所示^[7].

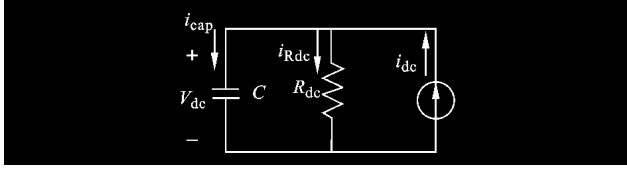
为了简化系统的数学模型,令

$$v_s = v_g - v_\infty; L = L_t + L_l; R = R_t + R_l$$

由图1a得到SSSC在abc坐标下交流侧的模型为



(a)虚框中为SSSC的AC边模型



(b)SSSC的DC边模型

v_t 是逆变器注入线路的电压; L_t 是逆变器及耦合变压器漏感;

R_t 逆变器及耦合变压器损耗; R_{dk} 代表逆变器开关损耗;

C 为SSSC直流侧电容

图1 具有SSSC补偿的电力系统单相等效电路

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & 0 & 0 \\ 0 & -R/L & 0 \\ 0 & 0 & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 0 \\ 0 & 0 & 1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1/L & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 0 \\ 0 & 0 & 1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ta} \\ v_{tb} \\ v_{tc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

由图1b得到SSSC在 abc 坐标下直流侧的模型

$$\begin{aligned} i_{dc} &= i_{Rdc} + i_{cap} \\ dv_{dc}/dt &= i_{dc}/C - v_{dc}/(R_{dc}C) \end{aligned} \quad (2)$$

以 dq 坐标系表示的逆变器输出电压为

$$\begin{pmatrix} v_{d1} \\ v_{q1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k(n_1/n_2)m_a v_{dc} \cos(\theta_{cr}) \\ k(n_1/n_2)m_a v_{dc} \sin(\theta_{cr}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: k 为逆变器直流侧电压与交流侧电压峰值关系系数; n_1/n_2 为耦合变压器变比; m_a 为调制系数; θ_{cr} 为控制信号相角. 根据SSSC三相交流侧与直流侧功率的瞬时值相等, 得到

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3}{2C} \left[k \frac{n_1}{n_2} m_a \cos(\theta_{cr}) i_d + k \frac{n_1}{n_2} m_a \sin(\theta_{cr}) i_q \right] - v_{dc}/(CR_{dc}) \quad (4)$$

文献说明了SSSC感性补偿时, 不会产生谐振点, 因此下面仅分析SSSC容性补偿的特性. SSSC的详细控制过程如图2所示. 容性补偿时, 注入线路电压滞后于线路电流 90° , 同时考虑到SSSC直流侧电容的充放电问题, 故SSSC注入电压的角度为

$$\theta_{cr} = \theta_{ir} - \pi/2 + \beta \quad (5)$$

将式(1)通过从固定不变的 abc 坐标系统到旋转 dq 坐标变换, 结合式(3)~式(5), 便得到了SSSC容性补偿时 dq 坐标的基频(ω_0)数学模型

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega_0 & -\mu_2 \sin \delta_1 \\ -\omega_0 & -R/L & \mu_2 \cos \delta_1 \\ \mu_1 \sin \delta_1 & -\mu_1 \cos \delta_1 & -\frac{1}{CR_{dc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} +$$

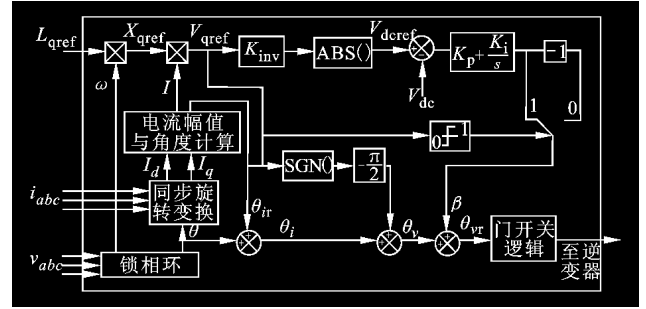


图2 静止同步串联补偿器控制框图

$$\begin{bmatrix} 1/L & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\mu_1 = \frac{3}{2C} k \frac{n_1}{n_2} m_a$; $\mu_2 = \frac{1}{L} k \frac{n_1}{n_2} m_a$; $\delta_1 = \theta_{ir} + \beta$.

本文采用文献[7]中的线路参数, 分别分析了25%、35%、45%和55%(对应的补偿电抗 X_q 分别为25.65、35.91、46.17、56.43 Ω)4种补偿度时不同控制策略对阻抗特性的影响. 由式(6)等号左侧为0, 便可分别计算出4种补偿度时对应的系统稳态状态参数 i_{d0} 、 i_{q0} 和 v_{d0} .

2 SSSC 控制模式对系统频域特性的影响

2.1 常电抗模式下的系统频域特性分析

在图3中的发送端, 除基频 ω_0 的交流电源 v_g 外, 又额外增加了一个正序的次同步频率 ω 的激励电压源 v_1 , 用于SSSC的频域分析.

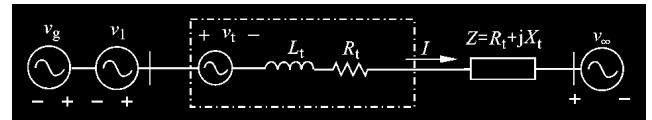


图3 具有SSSC补偿的电力系统单相等效电路

由图3可得到电压源逆变器在 $\alpha\beta$ 坐标下交流侧方程为

$$\begin{pmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{1\alpha} \\ v_{1\beta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} v_{t\alpha} \\ v_{t\beta} \end{pmatrix} \quad (7)$$

直流侧方程为

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = (\mu_1 \sin(\omega_0 t + \delta_1) - \mu_1 \cos(\omega_0 t + \delta_1)) \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (8)$$

SSSC逆变器输出电压为

$$v_{iq\beta}(t) = \begin{pmatrix} v_{i\alpha}(t) \\ v_{i\beta}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L\mu_2 \sin(\omega_0 t + \delta_1) \\ L\mu_2 \cos(\omega_0 t + \delta_1) \end{pmatrix} v_{dc}(t) \quad (9)$$

正序的基频电压和次同步电压可分别表示为

$$\mathbf{v}_s(t) = v_{s0}(t) + jv_{s\beta}(t) = V_s \angle \zeta_0 e^{j\omega_0 t} \quad (10)$$

$$\mathbf{v}_1(t) = v_{1\alpha}(t) + jv_{1\beta}(t) = V_1 \angle \zeta_1 e^{j\omega t} \quad (11)$$

式中:符号 (V_s, ζ_0) 和 (V_1, ζ_1) 分别为角频率 ω_0 和 ω 的激励电压的幅值和相角.由文献[8-9]可知,在电压源逆变器输基频 ω_0 的电压与网侧正序的次同步频率 ω 信号交互作用下,在网侧会产生角频率为 ω 和 $(2\omega_0 - \omega)$ 的电流分量,直流侧会产生角频率为 $(\omega_0 - \omega)$ 的脉动.由此,交流侧的电流可表示为

$$\mathbf{i}(t) = i_\alpha(t) + ji_\beta(t) = I_0 \angle \varphi_0 e^{j\omega_0 t} + I_1 \angle \varphi_1 e^{j\omega t} + I_2 \angle \varphi_2 e^{j(2\omega_0 - \omega)t} \quad (12)$$

式中: (I_0, φ_0) 、 (I_1, φ_1) 和 (I_2, φ_2) 分别为频率是 ω_0 、 ω 和 $(2\omega_0 - \omega)$ 的电流的幅值和相角.直流电压表示为

$$v_{dc}(t) = V_{dc} + V_{dcl} \cos[(\omega_0 - \omega)t + \epsilon_1] \quad (13)$$

式中: (V_{dcl}, ϵ_1) 是角频率为 $(\omega_0 - \omega)$ 的直流侧脉动电压的幅值和相角.

将式(10)~式(13)代入到式(7)~式(9),可得

$$\begin{pmatrix} R + j\omega L & 0 \\ 0 & R + j(2\omega_0 - \omega)L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} j\rho_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j\rho_1 & j\rho_3 \angle \theta_{ir0} & -j\rho_2 \angle \theta_{ir0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ V_{dcl} \\ \beta_1 \end{pmatrix} -$$

$$\begin{pmatrix} 0 & -j\rho_1 \angle 2\theta_{ir0} & j\rho_3 \angle \theta_{ir0} & -\rho_2 \angle \theta_{ir0} \\ -j\rho_1 \angle 2\theta_{ir0} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1^* \\ I_2^* \\ V_{dcl}^* \\ \beta_1^* \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$j(\omega_0 - \omega)V_{dcl} = \mu_1 I_0 \beta_1 \quad (15)$$

式中: $\rho_1 = \mu_2 V_{dcl} L / (2I_0)$, V_{dcl} 是稳态时直流电压的幅值; $\rho_2 = \mu_2 V_{dcl} L / 2$; $\rho_3 = \mu_2 L / 2$;下划线表示取变量的峰值.

SSSC的直流电压采用PI控制器.由图2可见,常电抗模式时,次同步电压源作用下的有功交换角

$$\beta_1 = \left\{ -K_p + j \frac{K_i}{\omega_0 - \omega} \right\} \{ V_{dcl} - V_{dclref} \} \quad (16)$$

$$v_{dclref}(t) = (1/K_{inv}) X_{qref} | \mathbf{i}(t) | \quad (17)$$

忽略高频成分和基频部分, $| \mathbf{i}(t) |$ 近似为

$$| \mathbf{i}(t) | \approx I_1 \cos[(\omega_0 - \omega)t + \theta_{ir0} - \varphi_1] + I_2 \cos[(\omega_0 - \omega)t - \theta_{ir0} + \varphi_2] \quad (18)$$

将式(18)代入式(17),得到

$$V_{dclref} = (1/K_{inv}) X_{qref} (I_1^* \angle \theta_{ir0} + I_2 \angle -\theta_{ir0}) \quad (19)$$

将式(19)代入到式(16),可得到常电抗模式下SSSC有功交换角 β_1 .将式(14)、式(15)按实部、虚部展开,得到SSSC常电抗模式方程为

$$\begin{pmatrix} M_{11} & -M_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{21} & M_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} & -M_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{43} & M_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -M_{56} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{65} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{77} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{88} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{1m} \\ I_{1n} \\ I_{2m} \\ I_{2n} \\ V_{dclm} \\ V_{dcln} \\ \beta_{1m} \\ \beta_{1n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -N_{12} & N_{13} & -N_{14} & -N_{15} & N_{16} & -N_{17} & -N_{18} \\ N_{21} & 0 & -N_{23} & -N_{24} & N_{25} & N_{26} & -N_{27} & N_{28} \\ N_{31} & -N_{32} & 0 & -N_{34} & -N_{35} & -N_{36} & -N_{37} & N_{38} \\ -N_{41} & -N_{42} & N_{43} & 0 & N_{45} & -N_{46} & -N_{47} & -N_{48} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{57} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{68} \\ N_{71} & N_{72} & N_{73} & N_{74} & -N_{75} & -N_{76} & 0 & 0 \\ N_{81} & -N_{82} & -N_{83} & N_{84} & N_{85} & -N_{86} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{1m} \\ I_{1n} \\ I_{2m} \\ I_{2n} \\ V_{dclm} \\ V_{dcln} \\ \beta_{1m} \\ \beta_{1n} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{1m} \\ V_{1n} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

式中:下标m和n分别代表电压量和电流量的实部和虚部,并且

$$M_{11} = M_{22} = M_{33} = M_{44} = R; M_{12} = M_{21} = \omega L \\ M_{56} = M_{65} = \omega_0 - \omega; M_{77} = M_{88} = 1$$

$$\begin{aligned}
M_{34} &= M_{43} = (2\omega_0 - \omega)L \\
N_{12} &= N_{21} = N_{34} = N_{43} = \rho_1 \\
N_{13} &= N_{24} = N_{31} = N_{42} = \rho_1 \sin 2\theta_{ir0} \\
N_{14} &= N_{23} = N_{32} = N_{41} = \rho_1 \cos 2\theta_{ir0} \\
N_{15} &= N_{26} = N_{35} = N_{46} = \rho_3 \sin \theta_{ir0} \\
N_{16} &= N_{25} = N_{36} = N_{45} = \rho_3 \cos \theta_{ir0} \\
N_{17} &= N_{28} = N_{37} = N_{48} = \rho_2 \cos \theta_{ir0} \\
N_{18} &= N_{27} = N_{38} = N_{47} = \rho_2 \sin \theta_{ir0} \\
N_{57} &= N_{68} = \mu_1 I_0 \\
N_{71} &= N_{82} = \frac{K_p X_{qref} \cos \theta_{ir0}}{K_{inv}} + \frac{K_i X_{qref} \sin \theta_{ir0}}{(\omega_0 - \omega) K_{inv}} \\
N_{72} &= N_{81} = \frac{K_p X_{qref} \sin \theta_{ir0}}{K_{inv}} - \frac{K_i X_{qref} \cos \theta_{ir0}}{(\omega_0 - \omega) K_{inv}} \\
N_{73} &= N_{84} = \frac{K_p X_{qref} \cos \theta_{ir0}}{K_{inv}} - \frac{K_i X_{qref} \sin \theta_{ir0}}{(\omega_0 - \omega) K_{inv}} \\
N_{74} &= N_{83} = \frac{K_p X_{qref} \sin \theta_{ir0}}{K_{inv}} + \frac{K_i X_{qref} \cos \theta_{ir0}}{(\omega_0 - \omega) K_{inv}} \\
N_{75} &= N_{86} = K_p; N_{76} = N_{85} = K_i / (\omega_0 - \omega)
\end{aligned}$$

式(20)可以被表示为广义的线性矩阵方程

$$\mathbf{M}\mathbf{x} = \mathbf{N}\mathbf{x} + \mathbf{u}$$

假设 $(\mathbf{M}-\mathbf{N})$ 是可逆的,则

$$\mathbf{x} = (\mathbf{M}-\mathbf{N})^{-1}\mathbf{u} \quad (21)$$

根据式(21),便可求得次同步激励电压源在不同频率时的 I_{1m} 、 I_{1n} 、 I_{2m} 、 I_{2n} 、 V_{dclm} 、 V_{dcln} 、 β_{1m} 和 β_{1n} 值。在 I_{1m} 和 I_{1n} 被算出后,可得到不同次同步频率下的线路阻抗

$$Z_i = V_i / I_i = (V_{1m} + jV_{1n}) / (I_{1m} + jI_{1n}) \quad (22)$$

2.2 常电抗模式下的理论分析与仿真对比

在图3中,发送端 v_g 和接收端 v_{∞} 线电压均为 138 kV,发送端和接收端电压相角 $\delta_g - \delta_{\infty}$ 为 30° ,电力系统的基频为 60 Hz,次同步频率激励电压源为 2 kV,频率变化范围为 0~60 Hz。

利用数学分析软件 Matcad 13,根据式(21)、式(22)分别得到 SSSC 常电抗模式下,次同步电流和线路阻抗的频域图,见图4。电流的峰值随着补偿量的不同而变化,分布范围从 7~47 Hz。从图5中可以看出,线路阻抗特性与存在串联固定电容的线路阻抗特性类似。这说明 SSSC 补偿在次同步频率范围线路阻抗也具有谐振最小值,因此 SSSC 也具有 SSR 的可能性,结论与文献[7]一致。

仿真采用补偿度为 55% 的第4种情况,得到图6所示的阻抗特性。由图6可见,当次同步频率激励源为 47 Hz 时,线路阻抗出现最低点,线路阻抗相角为 0° ,说明系统存在该频率下的电气谐振。仿真结果与理论分析完全相符。

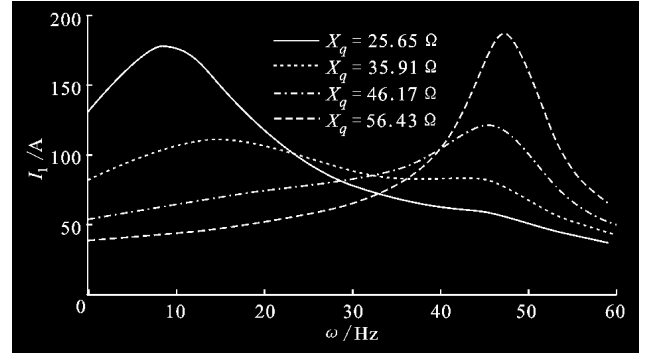


图4 SSSC 常电抗模式下系统频域特性的理论结果

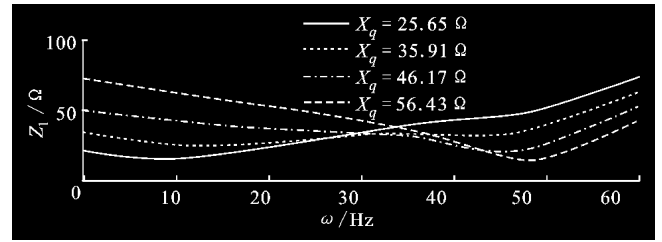


图5 SSSC 常电抗模式下线路阻抗特性的理论结果

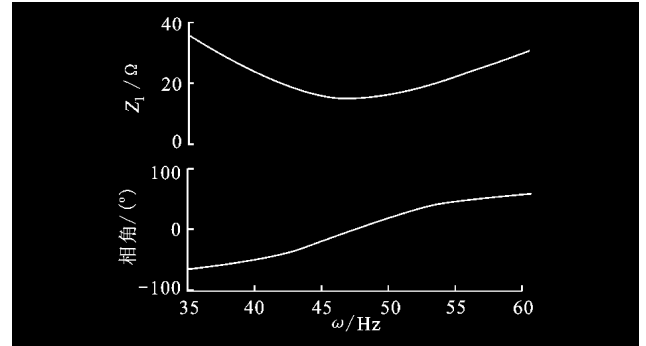


图6 SSSC 常电抗模式下线路阻抗特性的仿真结果

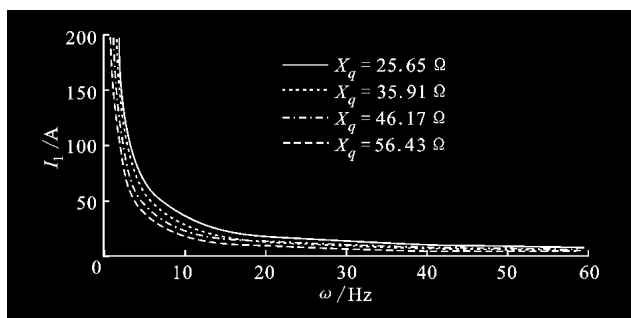
2.3 电感模式下的理论与仿真分析

本文提出了一种新的控制策略——电感模式,即补偿指令为电感且可正可负,SSSC 补偿电抗与线路电抗随次同步频率同比例线性变化,不会产生容抗与感抗在某一频率谐振的可能性。这种控制策略可阻尼 SSSC 补偿的电力系统产生 SSR 的可能性。如图2所示,该方法在常规检测的基础上,同时检测线路频率。当线路电流包含次同步频率分量时,在装置容量允许的条件下,控制 SSSC 对次同步量感性补偿,增大线路电抗,消除 SSR 的可能性,SSSC 的补偿量为

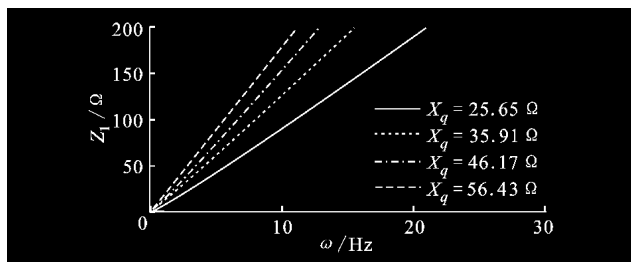
$$\mathbf{V}_t = j\omega L_{qref} \mathbf{I} \quad (23)$$

利用常电抗下分析系统频域特性的方法,可计算得到角频率为 ω 的次同步频域特性,如图7所示。

由图7a可见,在次同步频率范围内,角频率为 ω 的次同步电流值变化平稳,与图4相比电流值明显变小。图7b与图5相比,在次同步频率范围内,线



(a)次同步电流分量



(b)线路阻抗特性

图7 SSSC电感模式下系统频域特性的理论结果

路等效阻抗随着次同步频率增大而明显增大,不存在电气谐振频率。

电感模式仿真同样采用补偿度为55%的第4种情况,图8为仿真得到的线路阻抗的频域图。与图6对比,47 Hz处谐振点消失,在次同步频率范围内,没有谐振点出现,线路阻抗明显增大,完全消除了发生SSR的可能性。仿真与理论计算得到的结果完全一致。

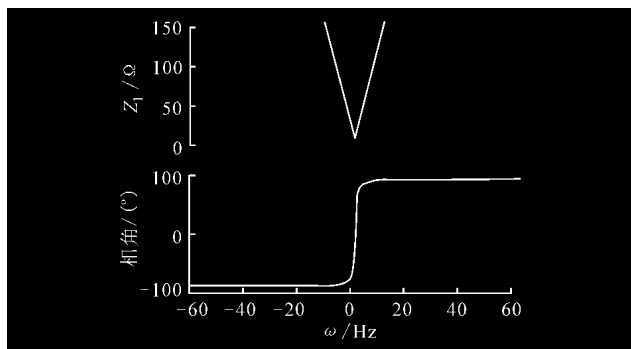


图8 SSSC常电感模式下线路阻抗特性的仿真结果

3 结论

(1)分析得到了SSSC补偿系统详细的频域特性数学方程,包含了补偿度及控制参数对频域特性

的影响。

(2)理论分析与仿真验证了SSSC在常电抗模式下具有与固定电容补偿相似的系统频域特性,论述了具有SSSC装置的电力系统中,有产生SSR的可能性。

(3)提出了一种新的SSSC控制策略——电感模式。通过同样的理论分析和仿真方法,证明了在次同步频率范围,电感模式补偿的电力系统阻抗特性不存在目前控制模式所具有的谐振点,并能有效提高线路阻抗,明显抑制次同步电流,消除产生SSR的可能性。

参考文献:

- [1] GYUGYI L, SCHAUDER C D, SEN K K. Static synchronous series compensator: a solid-state approach to the series compensation of transmission lines [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(1): 406-417.
- [2] GYUGYI L. Dynamic compensation of ac transmission lines by solid-state synchronous voltage sources [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 9(2): 904-911.
- [3] KALYAN K Sen. SSSC—static synchronous series compensator theory, model, and applications [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(1): 241-246.
- [4] 徐政译. 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] GYUGYI L. Unified power flow control concept for flexible AC transmission systems [J]. IEE Proceedings, C, 1992, 139(4): 323-331.
- [6] RIGBY B S, HARLEY R G. Resonant characteristics of inverter based transmission line series compensators [C] // Proc 30th Annu IEEE Power Electronics Specialist Conf. Piscataway: IEEE, 1999: 412-417.
- [7] PRADHAN A C, LEHN P W. Frequency-domain analysis of the static synchronous series compensator [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 440-449.
- [8] MOHADDES M, GOLE A M, SLADJANA E. Steady state frequency response of STATCOM [J]. IEEE Trans Power Del, 2001, 16(1): 18-23.
- [9] SCHAUDER C, MEHTA H. Vector analysis and control of advanced static VAR compensators [J]. Proc Inst Elect Eng: C, 1993, 140(4): 299-306.

(编辑 杜秀杰)