

# 基于 SSSC 和励磁协调抑制次同步振荡的线性最优控制器设计

鹿建成<sup>1,2</sup>, 李啸聪<sup>2</sup>, 黄维<sup>2</sup>, 查中魁<sup>2</sup>, 黄承喜<sup>2</sup>, 席云<sup>2</sup>

(1. 宣城供电公司, 安徽 宣城 232000; 2. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 为研究机电扰动情况下静止同步串联补偿器 (SSSC) 和励磁线性最优控制器 (LOSEC) 对次同步振荡 (SSO) 的抑制效果, 提出用经典线性最优控制理论并结合次时间最优控制的加权矩阵方法设计该控制器。此外, 与无控制器及 SSSC 最优控制策略 (LOSC) 对比, 分析系统的特征值, 可以看出 LOSEC 能有效地提高系统阻尼比和运行稳定性。最后, 在 Matlab/Simulink 上搭建了包含 SSSC 的单机无穷大系统电磁暂态模型。仿真结果证实该设计的 LOSEC 方法在短路扰动下抑制次同步振荡的效果更显著。  
**关键词:** 静止同步串联补偿器; 次同步振荡; 线性最优控制; 加权矩阵; 时域仿真

## Linear optimal controller of static series synchronous compensator and excitation to suppress sub-synchronous oscillation

LU Jiancheng<sup>1,2</sup>, LI Xiaocong<sup>2</sup>, HUANG Wei<sup>2</sup>, ZHA Zhongkui<sup>2</sup>, HUANG Chengxi<sup>2</sup>, XI Yun<sup>2</sup>

(1. Xuancheng Power Supply Company, Xuancheng 232000, China; 2. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** To study how the linear optimal comprehensive controller of Static Synchronous Series Compensator (SSSC) and excitation to suppress sub-synchronous resonance in the disturbance situations of mechanical and electrical. A classical theory of linear optimal control theory and sub-time optimal control weighting matrix method are proposed. Compared to no controller and the SSSC optimal controller (LOSC), the system eigenvalue parameter analysis shows that LOSEC can improve system damping ratio and operational stability. Finally, the electromagnetic transient model of single machine infinite bus power system including SSSC is established by Matlab/Simulink. The simulation shows that under the short-circuit disturbance, using LOSEC method to suppress sub-synchronous resonance effect is more significant.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267001).

**Key words:** static synchronous series compensator; sub-synchronous resonance; linear optimal control; weighting matrix; time-domain simulation

中图分类号: TM311; TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0021-07

## 0 引言

近年来, 我国电网朝着大容量、远距离、超高压方向发展, 如何提高远距离、重负荷、跨区域交流输电系统的传输容量成为电力技术人员关心的头等大事。随着电力电子设备的发展, 新型 FACTS 设备加入串补输电系统的大家庭中, 通过灵活地调节 FACTS 设备提高了系统的运行稳定极限。但发

电机在平衡点运行时受到某种扰动 (短路故障或线路开关误动作等), 会导致串补输电回路内部形成的电气谐振频率与汽轮发电机组轴系扭振固有频率互补, 极易引发次同步振荡问题<sup>[1-3]</sup>。

次同步振荡已经严重威胁着电网的安全稳定运行, 成为国内外学术界争相研究的课题<sup>[4-6]</sup>。文献[7]基于电压型逆变器 (VSD) 提出一种次同步电压控制策略来抑制次同步谐振, 采用复转矩系数法推导出该控制策略可以提供正的电气阻尼, 时域仿真法也验证了它的有效性。文献[8]设计了可控串补 (TCSC) 的线性最优控制器, 运用次时间最优控制的加权矩阵方法来确定  $Q$  矩阵, 避免了试凑的盲目性。文献[9]针对静止同步串联补偿器 (SSSC) 和固定串联电

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51267001); 广西科学基金资助项目 (桂科自 0728027); 南宁市市校科技合作专项项目 (200801029D); 北海市市校科技合作专项项目 (北科合 200801027)

容器(FSC)组成的混合串联补偿装置(HSC), 设计了主动阻尼控制器及参数整定方法, 不仅能很好地抑制 SSR, 更能降低输电线路的造价成本。

本文基于 IEEE 次同步谐振第一标准测试系统, 在单机无穷大系统中用 SSSC 替代固定电容, 建立了汽轮发电机组的轴系模型、发电机电磁暂态回路方程、含 SSSC 的输电线路系统数学模型。利用 SSSC 能比固定串补提供更大的正阻尼特性和励磁调节器可以控制电磁转矩来抑制轴系间扭矩振荡的优势, 用经典的线性最优控制理论<sup>[10]</sup>设计抑制次同步振荡的综合控制器, 验证电力系统在短路扰动情况下该控制器抑制 SSO 的有效性。

### 1 系统的数学模型

在研究机电耦合作用引起的次同步振荡问题时, 不能简单地将转子模型视为一个集中刚性质量块, 而应采用分段集中的质量块弹簧模型。在理论研究中, 典型的大型汽轮发电机组轴系结构分为高压缸 HP, 中压缸 IP, 低压缸 LPA, 低压缸 LPB, 发电机和励磁机等六个质量块<sup>[11]</sup>。含有 SSSC 的单机无穷大系统中模型结构图如图 1 所示, 图中 SSSC 是由耦合变压器、电压源逆变器、直流电容和并联电阻组成, 它通过向线路串联输入与线路电流成 90° 相角差的电压, 可实现与输电线路交换有功与无功的功能。由于 SSSC 没有交流电容, 因此不会与系统产生谐振而引起次同步谐振现象, 相对于 TCSC, SSSC 更具有天然的抑制次同步谐振的优势。

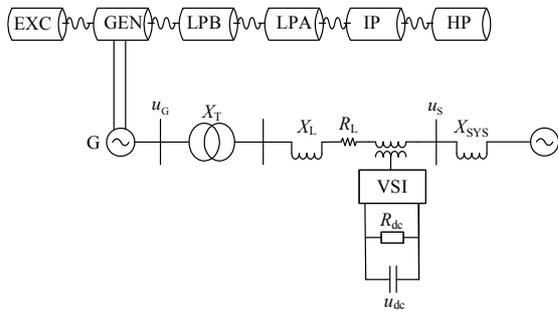


图 1 含 SSSC 的单机无穷大系统模型结构图  
Fig. 1 Diagram of single-machine infinite bus system with SSSC

#### (1) 汽轮发电机轴系模型

各刚性质量块通过无质量的弹簧连接, 模拟出主蒸汽产生的原动力矩如何从高压缸开始逐步传递下去。各质量块上受到的蒸汽转矩或者电磁转矩, 轴段之间的扭矩和阻尼转矩彼此相互作用, 维持轴系的动态平衡。选择同步旋转轴为参考轴, 下式中

刚体的旋转角位移  $\delta_i$  和旋转角速度  $\omega_i$  都是该参考轴标准设定的。根据虎克定律和牛顿第二力学定律得轴系模型为

$$\begin{cases} (T_j p^2 + Dp + K)\delta = T_m - T_e \\ p\delta = \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $p = d/dt$  为对时间的导数;  $T_j = \text{diag}(T_{j1}, T_{j2}, \dots, T_{j6})$  为质块的惯性时间常数;  $D = \text{diag}(D_1, D_2, \dots, D_6)$  为质块的自阻尼系数(忽略互阻尼系数);  $\delta = [\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_6]^T$  为各质块的旋转角位移;  $\omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_6]^T$  为各质块的旋转角速度;  $T_m = [T_{m1} \ T_{m2} \ \dots \ T_{m6}]^T$  和  $T_e = [T_{e1} \ T_{e2} \ \dots \ T_{e6}]^T$  分别为各质块的机械转矩和电磁转矩;  $K$  为质块间的轴系弹性系数, 其表达式为

$$K = \begin{bmatrix} K_{12} & -K_{12} & & & & \\ -K_{12} & K_{12} + K_{23} & -K_{23} & & & \\ & -K_{23} & K_{23} + K_{34} & -K_{34} & & \\ & & -K_{34} & K_{34} + K_{45} & -K_{45} & \\ & & & -K_{45} & K_{45} + K_{56} & -K_{56} \\ & & & & -K_{56} & K_{56} \end{bmatrix}$$

#### (2) 发电机电磁暂态回路模型<sup>[12]</sup>

将 abc 坐标下的电磁方程经过 Park 变换后得到 dq 轴坐标下的模型为式(2)和式(3)。

$$\begin{cases} u_d = p\Psi_d - \omega_k \Psi_q - r_a i_d \\ u_q = p\Psi_q - \omega_k \Psi_d - r_a i_q \\ u_f = p\Psi_f + r_f i_f \\ u_D = p\Psi_D + r_D i_D \equiv 0 \\ u_Q = p\Psi_Q + r_Q i_Q \equiv 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Psi_d = -X_d i_d + X_{ad} i_f + X_{ad} i_D \\ \Psi_q = -X_q i_q + X_{aq} i_Q \\ \Psi_f = -X_{ad} i_d + X_f i_f + X_{ad} i_D \\ \Psi_D = -X_{ad} i_d + X_{ad} i_f + X_D i_D \\ \Psi_Q = -X_{aq} i_q + X_Q i_Q \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\omega_k$  为发电机质块的转子角速度;  $u_d$ 、 $u_q$ 、 $u_f$ 、 $u_D$ 、 $u_Q$  分别为定转子绕组电压;  $\Psi_d$ 、 $\Psi_q$ 、 $\Psi_f$ 、 $\Psi_D$ 、 $\Psi_Q$  分别为定转子绕组磁链;  $i_d$ 、 $i_q$ 、 $i_f$ 、 $i_D$ 、 $i_Q$  分别为定转子绕组电流;  $r_a$ 、 $r_f$ 、 $r_D$ 、 $r_Q$  分别为定转子绕组电阻;  $X_d$ 、 $X_q$ 、 $X_f$ 、 $X_D$ 、 $X_Q$ 、 $X_{ad}$ 、 $X_{aq}$  分别为定转子绕组的自感和互感。发电机转子质块的电磁转矩表示为

$$T_e = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d \quad (4)$$

(3) 含 SSSC 的输电线路模型

根据电路理论, 含 SSSC 的输电线路数学模型为

$$R_L i + L p i + u_{sc} = u_G - u_s \quad (5)$$

式中:  $R_L$ 、 $L$  为输电线路的电阻和电感;  $u_{sc}$ 、 $u_G$ 、 $u_s$  分别为 SSSC 注入输电线路的电压, 发电机机端电压, 无穷大母线处电压。基于 Park 变换得

$$\begin{cases} u_d = R_L i_d - \omega_k L i_q + L p i_d + u_s \sin \delta_k + u_{scd} \\ u_q = R_L i_q + \omega_k L i_d + L p i_q + u_s \cos \delta_k + u_{scq} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\delta_k$  为发电机质块的转子角位移;  $u_{scd} = m u_{dc} \cos(\delta_{ss})/\sqrt{2}$  为 SSSC 注入电压的 d 轴分量;  $u_{scq} = m u_{dc} \sin(\delta_{ss})/\sqrt{2}$  为 SSSC 注入电压的 q 轴分量;  $m$  为脉宽调制系数;  $\delta_{ss}$  为 SSSC 输出电压相角<sup>[13]</sup>。

由于 SSSC 交流侧和直流侧的瞬时有功功率相等, 可得

$$\frac{3}{2} (u_{scd} i_d + u_{scq} i_q) = C p u_{dc} u_{dc} + \frac{u_{dc}^2}{R_{dc}} \quad (7)$$

式中:  $u_{dc}$  为直流侧的电容电压;  $R_{dc}$  为电容两端的并联电阻。

## 2 数学模型的线性化设计

对式(3)做逆变换, 偏差化得

$$\Delta \mathbf{i} = \mathbf{G} \Delta \Psi \quad (8)$$

式中:  $\Delta \mathbf{i} = [\Delta i_d \ \Delta i_q \ \Delta i_f \ \Delta i_D \ \Delta i_Q]^T$ ;

$\Delta \Psi = [\Delta \Psi_d \ \Delta \Psi_q \ \Delta \Psi_f \ \Delta \Psi_D \ \Delta \Psi_Q]^T$ ;

$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ G_{51} & \cdots & G_{55} \end{bmatrix}$  为逆变后的矩阵系数。

将轴系模型式(1)线性化得

$$\begin{cases} (\mathbf{T}_j p^2 + \mathbf{D} p + \mathbf{K}) \Delta \delta = \Delta \mathbf{T}_m - \Delta \mathbf{T}_e \\ p \Delta \delta = \Delta \omega \end{cases} \quad (9)$$

式中: 设  $\Delta \mathbf{T}_m = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ;

$\Delta \mathbf{T}_e = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \Delta T_e \ 0]^T$ 。

由式(4)知

$$\Delta T_e = \begin{pmatrix} -\Psi_{q0} & \Psi_{d0} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} -i_{q0} & i_{d0} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \Psi_d \\ \Delta \Psi_q \end{bmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} -\Psi_{q0} & \Psi_{d0} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{15} \\ G_{21} & \cdots & G_{25} \end{bmatrix} \Delta \Psi +$$

$$\begin{pmatrix} -i_{q0} & i_{d0} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Delta \Psi = \mathbf{a}^T \Delta \Psi$$

式中,  $\mathbf{a}$  为  $5 \times 1$  阶的矩阵。

令  $\mathbf{A}' = [\mathbf{0}_{4 \times 5} \ \mathbf{a}^T \ \mathbf{0}_{1 \times 5}]^T$ , 则轴系模型转化为

$$\begin{cases} p \Delta \omega = -\mathbf{T}_j^{-1} \mathbf{D} \Delta \omega - \mathbf{T}_j^{-1} \mathbf{K} \Delta \delta + \mathbf{T}_j^{-1} \mathbf{A}' \Delta \Psi \\ p \Delta \delta = \Delta \omega \end{cases} \quad (10)$$

将式(8)代入式(2)得

$$\begin{cases} p \begin{bmatrix} \Delta \Psi_d \\ \Delta \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} + \omega_{k0} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \Psi_d \\ \Delta \Psi_q \end{bmatrix} + \\ \Delta \omega_k \begin{bmatrix} \Psi_{q0} \\ -\Psi_{d0} \end{bmatrix} + r_a \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{15} \\ G_{21} & \cdots & G_{25} \end{bmatrix} \Delta \Psi \\ p \begin{bmatrix} \Delta \Psi_f \\ \Delta \Psi_D \\ \Delta \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{31} & \cdots & G_{35} \\ G_{41} & \cdots & G_{45} \\ G_{51} & \cdots & G_{55} \end{bmatrix} \Delta \Psi \end{cases} \quad (11)$$

将输电网络模型式(6)偏差化得

$$\begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_L & -\omega_{k0} L \\ \omega_{k0} L & R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} p \Delta i_d \\ p \Delta i_q \end{bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} u_s \cos \delta_{k0} \\ -u_s \sin \delta_{k0} \end{bmatrix} \Delta \delta_k + \begin{bmatrix} \Delta u_{scd} \\ \Delta u_{scq} \end{bmatrix} u_{dc0} + \begin{bmatrix} u_{scd0} \\ u_{scq0} \end{bmatrix} \Delta u_{dc} \quad (12)$$

式中,  $u_{scd0}$ 、 $u_{scq0}$  表示对应控制量的稳定运行值。

将式(8)代入式(12)消去  $\Delta i_d$ 、 $\Delta i_q$ , 得

$$\begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_L & -\omega_{k0} L \\ \omega_{k0} L & R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{15} \\ G_{21} & \cdots & G_{25} \end{bmatrix} p \Delta \Psi + \\ \begin{bmatrix} u_s \cos(\delta_{k0}) \\ -u_s \sin(\delta_{k0}) \end{bmatrix} \Delta \delta_k + \begin{bmatrix} \Delta u_{scd} \\ \Delta u_{scq} \end{bmatrix} u_{dc0} + \begin{bmatrix} u_{scd0} \\ u_{scq0} \end{bmatrix} \Delta u_{dc} \quad (13)$$

将式(13)代入式(11), 消去  $p \Delta \Psi$ , 得到状态量  $\Delta \mathbf{u}_{dq}$  表达式可设为

$$\Delta \mathbf{u}_{dq} = \mathbf{A}_1 \Delta \delta + \mathbf{A}_2 \Delta \omega + \mathbf{A}_3 \Delta \Psi + \\ \mathbf{A}_4 \Delta u_f + \mathbf{A}_5 \Delta u_{dc} + \mathbf{A}_6 \Delta u_{sc} \quad (14)$$

式中:  $\Delta \mathbf{u}_{dq} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$ ,  $\Delta \mathbf{u}_{sc} = \begin{bmatrix} u_{scd} \\ u_{scq} \end{bmatrix}$ 、 $\mathbf{A}_1$ 、 $\mathbf{A}_2$ 、 $\mathbf{A}_3$ 、

$\mathbf{A}_4$ 、 $\mathbf{A}_5$ 、 $\mathbf{A}_6$  是经过一系列推导计算出的参数矩阵, 分别是  $2 \times 6$ ,  $2 \times 6$ ,  $2 \times 5$ ,  $2 \times 1$ ,  $2 \times 1$ ,  $2 \times 2$  阶矩阵。

将式(14)代入式(11)中消去  $\Delta \mathbf{u}_{dq}$ , 得

$$p \Delta \Psi_{dq} = \mathbf{A}_1 \Delta \delta + (\mathbf{A}_2 + \mathbf{B}_2) \Delta \omega + (\mathbf{A}_3 + \mathbf{B}_1) \Delta \Psi + \\ \mathbf{A}_4 \Delta u_f + \mathbf{A}_5 \Delta u_{dc} + \mathbf{A}_6 \Delta u_{sc} \quad (15)$$

式中,

$$\mathbf{B}_1 = \omega_{k0} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + r_a \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{15} \\ G_{21} & \cdots & G_{25} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \Psi_{q0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Psi_{d0} & 0 \end{bmatrix}$$

将式(15)和  $p\Delta\Psi_{\text{dq}}$  合并得

$$p\Delta\Psi = \mathbf{D}_1\Delta\delta + \mathbf{D}_2\Delta\omega + \mathbf{D}_3\Delta\Psi + \mathbf{D}_4\Delta u_f + \mathbf{A}_5\Delta u_{\text{dc}} + \mathbf{A}_6\Delta u_{\text{sc}} \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{D}_1 = [\mathbf{A}_1 \quad \mathbf{0}_{3 \times 6}]^T$ ;  $\mathbf{D}_2 = [\mathbf{A}_2 \quad \mathbf{0}_{3 \times 6}]^T$ 。

$$\text{令 } \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{31} & \cdots & G_{35} \\ G_{41} & \cdots & G_{45} \\ G_{51} & \cdots & G_{55} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_3 = [\mathbf{A}_3 + \mathbf{B}_2 \quad \mathbf{C}_1]^T, \quad \mathbf{D}_4 = [\mathbf{A}_4 \quad 1 \quad 0 \quad 0]^T.$$

对式(7)化简并线性化得

$$\text{令 } \mathbf{F}_1 = \begin{pmatrix} \frac{3}{2C} u_{\text{scd}0} & \frac{3}{2C} u_{\text{scq}0} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{15} \\ G_{21} & \cdots & G_{25} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_2 = \begin{pmatrix} \frac{3}{2C} i_{d0} & \frac{3}{2C} i_{q0} \end{pmatrix}, \text{ 可得}$$

$$p\Delta u_{\text{dc}} = \mathbf{F}_1\Delta\Psi + \mathbf{F}_2\Delta u_{\text{sc}} - \frac{1}{R_{\text{dc}}} \Delta u_{\text{dc}} \quad (17)$$

则最终形成全系统的线性方程组, 其状态空间可描述为

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta}_{6 \times 1} \\ \Delta\dot{\omega}_{6 \times 1} \\ \Delta\dot{\Psi} \\ \Delta\dot{u}_{\text{dc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{T}_j^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{T}_j^{-1}\mathbf{D} & \mathbf{T}_j^{-1}\mathbf{A}' & \mathbf{0} \\ \mathbf{D}_1 & \mathbf{D}_2 & \mathbf{D}_3 & \mathbf{A}_5 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{F}_1 & -\frac{1}{R_{\text{dc}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_{6 \times 1} \\ \Delta\omega_{6 \times 1} \\ \Delta\Psi \\ \Delta u_{\text{dc}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_6 \\ \mathbf{F}_2 \end{bmatrix} \Delta u_{\text{sc}} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{D}_4 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \Delta u_f \quad (18)$$

### 3 SSSC 线性最优控制器设计

#### 3.1 控制律设计

上面已建立了系统状态空间方程  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$ , 选择最优控制系统的二次型性能指标为

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} [\mathbf{x}^T \mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R}\mathbf{u}] dt \quad (19)$$

根据系统给定的参数可以轻松确定参数矩阵  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ , 加权矩阵  $\mathbf{R}$  通常取为单位对角矩阵,  $\mathbf{Q}$  矩阵的选取在大多数设计中是取为对角阵, 并根据个人经验和状态变量在目标函数中的权系数进行试

凑<sup>[14]</sup>, 从而达到一种基本满足各项性能的加权矩阵。但由于自身局限于对角阵, 严重削弱了  $\mathbf{Q}$  矩阵在线性最优控制中的作用。文献[15]根据次时间最优控制理论来确定  $\mathbf{Q}$  矩阵, 即基于线性二次型最优状态反馈和次时间最优控制系统的  $\mathbf{Q}$  参数矩阵必须满足下列方程。

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T \mathbf{P}$$

$$\mathbf{E}^T \mathbf{Q} + \mathbf{Q}\mathbf{E} = -\mathbf{S}$$

$$\mathbf{E}\mathbf{S}^{-2} + \mathbf{S}^{-2}\mathbf{E}^T = -\mathbf{I}$$

编写程序算得理想的  $\mathbf{Q}$  矩阵。

然后调用 Matlab 函数

$$[\mathbf{K}, \mathbf{P}, \mathbf{E}] = \text{lqr}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}) \quad (21)$$

得到最优反馈增益矩阵  $\mathbf{K}$ , 及 Riccati 方程的解  $\mathbf{P}$ , 和闭环系统的极点  $\mathbf{E}$ , 最后得到最优控制量为

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x} \quad (22)$$

#### 3.2 抑制次同步振荡机理

当系统发生短路扰动故障时, 输电线路产生的某个低于同步频率的电气频率  $\omega_i$  与发电机组轴系的某个固有机械频率发生共振时, 一方面经过励磁调节器控制输出励磁电压  $u_f$ , 来间接调节发电机输出的电磁转矩  $\Delta T_e$ , 使得输出的  $\Delta T_e$  抑制各质量块之间扭矩的相互振荡。另一方面通过控制 SSSC 装置的输出补偿电压的幅值  $u_{\text{dc}}$  和相角  $\delta_{\text{SS}}$ , 可以在发电机电气扭矩  $\Delta T_e$  中附加与角速度偏移  $\Delta\omega$  同相位的阻尼转矩。通过两个正阻尼转矩的协调作用, 使得该控制器能很好地抑制各个模式下的次同步振荡, 减少轴系间的劳损。其内部功能原理框图如图 2 所示。

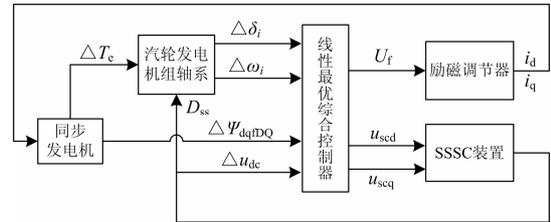


图 2 控制器内部功能原理框图

Fig. 2 Internal functions principle block diagram of the controller

#### 4 算例分析

本文基于 IEEE 次同步谐振第一标准测试模型, 汽轮发电机组及输电线路的参数主要参照文献[16], SSSC 内部的参数:  $R_{\text{dc}} = 0.25$ ,  $C = 0.4$ 。

系统的初始运行工况为

$$P_{e0} = 0.55, Q_{e0} = 0.0798, \delta_{k0} = 43.97^\circ, u_{\text{dc}0} = 0.1.$$

### 4.1 特征值分析

为凸显本章所设计的 SSSC 和励磁线性最优综合控制器(LOSEC)的优势, 本文还设计了不考虑励磁调节器作用的 SSSC 最优控制器(LOSC), 将它与无控制器以及 LOSEC 进行特征值对比, 得到各个模式下特征值实部及阻尼比见表 1 所示。从表 1 中可以看出在三种控制器作用下, 模态特征值的实部

都是负数, 但 LOSEC 控制器对应的特征值明显左移, 阻尼比显著增大, 都表明该控制器能更好地抑制轴间扭振, 消除轴系疲劳。表 2 表明当系统受到大扰动之后, 无控制器时系统有实部为正的实特征根, 系统不稳定, 而后两者控制器能使该自然振荡被有效地平息, 维持系统安全稳定运行。

表 1 各模式下三种控制状态系统特征值参数对比分析

Table 1 Each mode system eigenvalue parameter analysis under three control states

模态	无控制器		LOSC		LOSEC	
	实部	阻尼比	实部	阻尼比	实部	阻尼比
1	-0.587 1	0.002 0	-0.597 8	0.002 0	-0.616 5	0.002 1
2	-0.647 2	0.003 1	-8.198 4	0.040 1	-10.567 9	0.053 9
3	-0.532 5	0.003 3	-12.428 5	0.076 0	-18.617 4	0.118 7
4	-2.147 8	0.016 9	-4.031 9	0.031 9	-14.301 0	0.104 5
5	-1.186 5	0.011 9	-21.751 9	0.212 7	-73.010 9	0.520 8

表 2 低频部分三种控制状态下特征值对比

Table 2 System eigenvalue contrastive analysis of low frequency under three control states

控制器	无控制器	LOSC	LOSEC
特征值	-9 720.012+0.0j	-9 720.848+0.0j	-572.541+0.0j
	-201.236+0.0j	-206.294+0.0j	-283.701+0.0j
	-2.168 ± 20.195j	-38.831 ± 43.004j	-25.471 ± 68.957j
	0.977 ± 14.275j	-15.442 ± 2.279j	-56.448+0.0j
	-2.010+0.0j	-2.130+0.0j	-2.103+0.0j
	-0.057+0.0j	-0.065+0.0j	-0.023+0.0j
	-0.359+0.0j	-0.351+0.0j	-0.456+0.0j

### 4.2 仿真分析

应用 Matlab/Simulink 对如图 1 所示的单机无穷大系统进行时域仿真。系统在 2.5 s 无穷大母线处发生三相接地短路故障, 0.075 s 后继电保护装置动作, 切除故障。汽轮发电机组轴系各轴段之间的扭矩随时间变化的曲线如图 3 所示。从图中可以明显看出, 只通过控制 SSSC 装置输出电压的幅值和相位, 向系统输出正阻尼性质电磁功率的 LOSC 方法, 能使各轴段之间的扭矩经过短暂的振荡后能迅速恢复到平衡点, 有助于抑制系统在受扰动时产生的次同步振荡。但加入了励磁调节器后的 LOSEC 方法能使扭矩振荡幅度更小, 调节时间更短, 尤其对于事故频发的发电机与励磁机之间的轴段, 其抑制效果更加明显, 实用价值高。

从图 4、图 5 可以看出当系统发生短路故障时, 线路传输功率振荡超过运行稳定上限, SSSC 装置中的直流电容主动从线路中吸收有功功率, 电容电压  $u_{dc}$  升高; 同理当线路功率处于运行稳定下限时, 直流电容又会及时向线路注入有功功率, 电容电压  $u_{dc}$  降低。在 LOSEC 的控制策略下, 输电线路有功

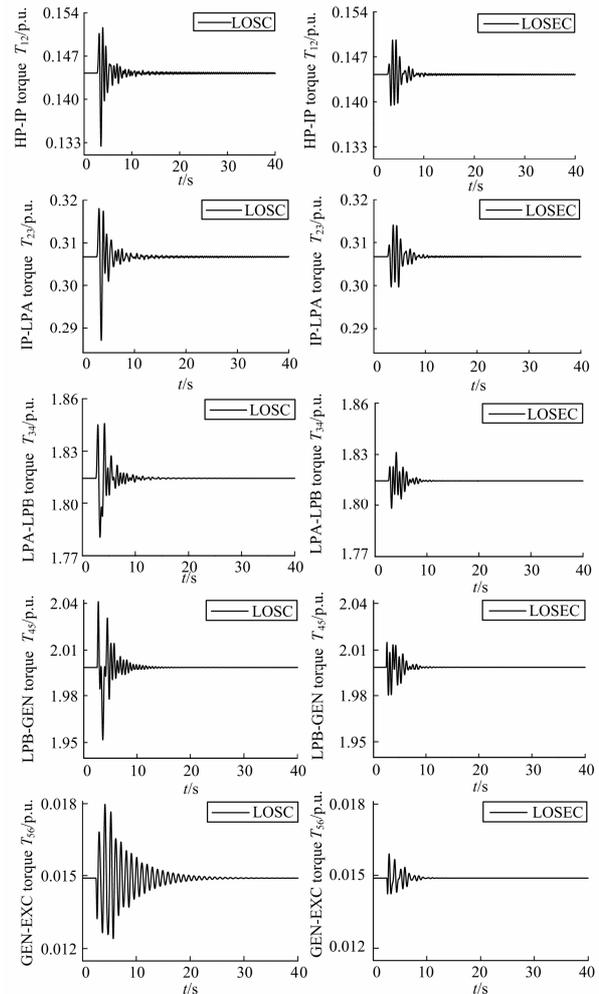


图 3 汽轮发电机组各轴段之间扭矩的暂态响应

Fig. 3 Steam turbine generator transient response of the torque between each shaft section

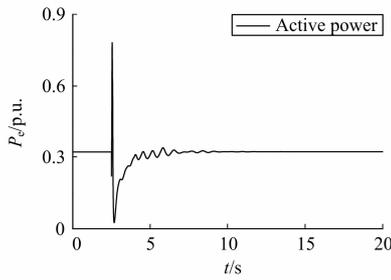


图 4 输电线路有功振荡曲线

Fig. 4 Transmission line active power oscillation curve

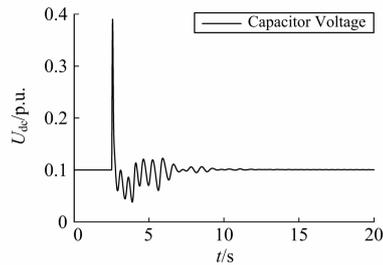


图 5 直流侧电容电压振荡曲线

Fig. 5 DC link capacitor voltage oscillation curve

功率和直流电容电压相互交互能量中都能振荡收敛到稳定运行值。说明LOSEC不仅能有效抑制次同步振荡，更能很好地控制功率振荡，提高运行的稳定性。

### 5 结论

本文针对含有 SSSC 装置的 IEEE 次同步谐振第一标准测试系统，充分利用 SSSC 装置和励磁调节器直接或间接地向系统提供正阻尼性质的电磁功率这一优势，归纳出含汽轮发电机组轴系模型、电磁暂态回路方程、含 SSSC 输电线路的系统数学模型，线性偏差后得到 18 阶状态空间方程，基于线性最优控制理论，应用次时间最优控制的加权矩阵确定方法，设计了抑制 SSO 的励磁和 SSSC 的协调控制器。特征值分析和仿真表明该控制器可以很好地抑制 SSO 现象，并有助于提高系统的运行稳定性，其控制效果明显优于 LOSC，具有一定的实用参考价值。

### 参考文献

[1] 文劲宇, 孙海顺, 程时杰. 电力系统次同步振荡问题[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 1-4, 7.  
WEN Jinyu, SUN Haishun, CHENG Shijie. Subsynchronous oscillation in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 1-4, 7.

[2] 任先文, 孔祥实, 令晓伟. 基于时滞反馈控制系统抑制次同步谐振[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17):

24-29.  
REN Xianwen, KONG Xiangshi, LING Xiaowei. Mitigating subsynchronous resonance (SSR) using delayed feedback control system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 24-29.

[3] 张剑, 肖湘宁, 高本锋, 等. 双馈风力发电机的次同步控制相互作用机理与特性研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 142-149, 159.  
ZHANG Jian, XIAO Xiangning, GAO Benfeng, et al. Mechanism and characteristic study on subsynchronous control interaction of a DFIG-based wind-power generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 142-149, 159.

[4] BONGIORNO M, ÅNGQUIST L, SVENSSON J. A novel control strategy for sub-synchronous resonance mitigation using SSSC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 1033-1041.

[5] BONGIORNO M, SVENSSON J, ÅNGQUIST L. Single-phase VSC based SSSC for sub-synchronous resonance damping[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1544-1552.

[6] 白菲菲, 和鹏, 张鹏, 等. 抑制次同步谐振的串补方案的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 39(19): 121-125, 149.  
BAI Feifei, HE Peng, ZHANG Peng, et al. Simulation research on series compensation schemes for damping sub-synchronous resonance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 39(19): 121-125, 149.

[7] 张剑, 肖湘宁, 高本锋, 等. 专用于抑制次同步振荡的次同步电压调制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 40-46.  
ZHANG Jian, XIAO Xiangning, GAO Benfeng, et al. Sub-synchronous voltage modulation strategy exclusively for mitigating sub-synchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 40-46.

[8] 李伟, 李兴源, 洪朝, 等. 抑制次同步谐振的可控串补线性最优控制器设计[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 10-14.  
LI Wei, LI Xingyuan, HONG Chao, et al. Comparison between methods for power system nonlinear modal analysis[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 10-14.

- [9] 高本锋, 肖湘宁, 赵成勇, 等. 混合串联补偿装置抑制次同步谐振的研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 142-147.  
GAO Benfeng, XIAO Xiangning, ZHAO Chengyong, et al. Study of hybrid series compensator on sub-synchronous resonance damping[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 142-147.
- [10] 卢强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [11] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [12] 倪以信, 陈寿松, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [13] 赵洋, 肖湘宁. 基于微分几何方法的静止同步串联补偿器非线性控制[J]. 电工技术学报, 2008, 23(4): 132-136.  
ZHAO Yang, XIAO Xiangning. Study of nonlinear control of SSSC based on differential geometry approach[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(4): 132-136.
- [14] 颜伟, 朱继忠, 徐国禹. UPFC 线性最优控制方式的研究及其对暂态稳定性的改善[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 45-49.  
YAN Wei, ZHU Jizhong, XU Guoyu. Enhancement of power system stability using linear optimal control strategy of UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 45-49.
- [15] 李祖文, 沈祖治. 水电机组线性最优调节器加权矩阵的确定方法[J]. 河海大学学报, 2000, 28(4): 45-49.  
LI Zuwen, SHEN Zuyi. A method of weighted matrix selection for hydroturbine linear optimal regulator[J]. Journal of Hohai University, 2000, 28(4): 45-49.
- [16] IEEE Sub-synchronous Resonance Task Force of the Dynamic System Performance Working Group Power System Engineering Committee. First benchmark model for computer simulation of sub-synchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.

---

收稿日期: 2014-03-27; 修回日期: 2014-06-24

作者简介:

鹿建成(1988-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: 532417667@qq.com

李啸聪(1959-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为控制系统计算机辅助设计, 电力系统动态仿真及计算机实时控制, 电力系统分析与控制, 农业工程自动化。