

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210853

采用 STATCOM 抑制多机系统次同步振荡的理论及仿真

毛俞杰, 孙海顺, 韩应生, 吴思成, 王东泽, 朱廷猛

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对远距离大容量输电系统中出现的多机系统次同步振荡(SSO), 分析了利用 STATCOM 附加电流的抑制策略, 采用了模态解耦控制方法, 详细介绍了控制器参数整定过程。在此基础上, 建立了网络中各元件的端口等效导纳矩阵。采用分散消元的复转矩系数法, 可以简化全系统复频域网络方程的生成, 便于分析发电机组的等效电气阻尼特性。最后以此方法分析了某实际串补输电系统的 SSO 特性以及 STATCOM 对 SSO 问题的抑制效果。结果表明, 该装置能够增加所有不稳定模态的电气阻尼, 有效抑制次同步振荡, 为系统中存在的多机多模态次同步振荡问题的解决提供了参考。

关键词: 次同步振荡; 复转矩系数; 复频域等效端口导纳模型; 静止无功补偿器; 静止同步补偿器; 多机多模态

Theory and simulation of STATCOM for damping subsynchronous oscillation of a multi-machine system

MAO Yujie, SUN Haishun, HAN Yingsheng, WU Sicheng, WANG Dongze, ZHU Tingmeng

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For the subsynchronous oscillation (SSO) of a multi-machine system in a long-distance and large-capacity transmission system, the suppression strategy using the additional current of STATCOM is analyzed. Modal decoupling control method is adopted, and the parameter setting process of the controller is described in detail. The port equivalent admittance matrix of each component in the network is established. The establishment of the complex frequency domain network equation of the whole system can be simplified by eliminating variables dispersedly in complex torque coefficient analysis, and it is convenient to analyze the equivalent electrical damping characteristics of the generator. Finally, the SSO characteristics of an actual series-compensated transmission system and the suppression effect of STATCOM on SSO problems are analyzed by this method. The results show the device can increase the electrical damping of all unstable modes and suppress subsynchronous oscillation effectively. This provides a reference for solving the SSO problems of multi-machine and multi-mode in the systems.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902002).

Key words: subsynchronous oscillation; complex torque coefficient; complex frequency domain port-equivalence conductance matrix (CPCM); static var compensator; static synchronous compensator; multi-machine and multi-mode

0 引言

目前, 大型汽轮发电机组^[1]是我国电力系统主要的发电设备, 汽轮发电机组轴系具有轻质柔性、多支承、大跨距、高功率密度等特征, 轴系固有频率谱相对较密, 诱发振动的能量较低。为了提高输送容量, 特/超高压远距离输电线路大都加装串联补偿装置, 使得发电机组次同步振荡问题日益严重。在一

定条件下配置串补的电网产生次谐波, 会激发系统的机电耦合振荡, 导致发电机轴系出现扭转振荡, 影响转子的机械性能和寿命, 甚至导致轴系断裂, 严重影响着电力系统的稳定性和用户的经济利益^[2-5]。

文献[6-12]介绍了不同元件引起的振荡问题, 其中大型火电机组经串补外送系统的次同步振荡问题可以采用复转矩系数法^[13]加以研究。文献[14]利用 PSCAD/EMTDC 时域仿真的方法实现了复转矩系数法对系统电气阻尼特性的分析, 但是仅局限于单机系统。文献[15]进一步考虑了多机系统的次同步

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902002)

振荡特性, 将非待研究发电机组用一个等值电源代替, 没有考虑其轴系动态对待研究机组的影响。文献[16]提出了采用分散消元方式快速计算发电机轴系扭振的 CPCM 方法, 同样没有考虑非待研究机组轴系动态。本文将基于 CPCM 的复转矩系数法用于多机系统, 进一步把系统中非待研究机组的轴系动态加以考虑, 分析系统的次同步振荡特性。

得到系统的次同步振荡特性之后, 进一步考虑该振荡的抑制措施^[17-27]。抑制次同步振荡措施有很多, 可以通过附加阻塞滤波器阻断次同步电气量^[18], 或者使用附加阻尼控制器来提高阻尼^[19]。其中灵活交流输电系统(Flexible AC Transmission Systems, FACTS)装置由于其快速灵活的控制特性, 越来越多地被用来抑制次同步振荡。文献[20]将 TCR 安装在机端, 以发电机转子速度偏差作为输入信号, 将 TCR 中的无功电流调制成与输入信号反相, 转速增加, 则 TCR 吸收无功功率减少, 机端电压上升, 使发电机转速下降, 达到抑制次同步振荡目的。文献[21]通过适当的脉冲触发控制, 使 TCSC 阻抗在次同步频率下呈感性, 改变电网谐振特性, 使得轴系自然扭振频率与电网谐振频率不再互补, 以此增大不稳定模式的阻尼, 来抑制对应的振荡问题。文献[22]输出功率比例微分反馈策略可在保持系统低频特性的同时, 有效抑制次同步谐振, 提高系统稳定性。文献[23]采用直驱风电机组附加控制的方法设计了一种次同步振荡鲁棒阻尼控制器, 能够为系统次同步振荡模式提供足够的阻尼。文献[24]将发电机母线电压和轴系转差信号作为控制信号输入到 STATCOM, 通过 PI 控制器产生抑制信号, 但是并没有考虑控制信号的模态分离, 在多机系统中控制信号不止一组, 存在相互干扰, 抑制效果可能受到影响。文献[25]将发电机组轴系的扭振频率作为输入信号, 输出抑制电流, 进而在转子上产生阻尼转矩, 在算例中实现了对次同步振荡的抑制, 但是没有给出控制参数整定的方法。文献[26]将一种改进的生物地理学优化算法应用于 SSSC 阻尼控制器的优化设计中, 成功抑制次同步振荡。文献[27]介绍了电气阻尼分析程序的开发, 为本文介绍的方法程序化提供启发。本文设计了基于 STATCOM 电流调制的次同步振荡稳定器, 采用多通道模态分离的控制策略, 该策略适用于多机系统, 并对其控制参数进行了细致的整定, 使其在实际系统中易于实现。

本文以国内某电厂经串补送出系统为研究对象, 运用基于 CPCM 的复转矩系数法, 分析了多机系统的 SSO 特性, 设计 STATCOM 控制器改善其中可能存在振荡风险的模态的电气阻尼, 成功抑制了

该系统的次同步振荡, 并结合时域仿真进行了验证。

1 实际系统简介

国内某电厂经串补送出系统扩建后的系统结构如图 1 所示。扩建前系统包括电厂 1 一期、二期四台同型号 600 MW 汽轮发电机组, 经过双回串补线路送至开关站, 与电厂 2 机组共同由开关站经过三回串补线路送往等值系统。原系统存在次同步振荡问题, 主要表现为电厂 1 一/二期机组模态三(27.8 Hz)发散振荡。因此, 电厂 1 在高压母线处经变压器安装了四台容量为 40 Mvar 的 SVC 抑制该振荡。

扩建后系统中电厂 1 增设三期两台 660 MW 机组, 增加相应串补线路。由于新增的机组与原来的型号不一致, 轴系参数不同, 对应的轴系模态也不同, 而且采取了经串补送出的方式, 可能存在新的振荡问题, 有必要对扩建后系统中存在的多机多模态情形开展次同步振荡研究。对于可能出现的新振荡模态, 基于 SVC 的原抑制装置的抑制效果可能不足, 此时需要研究基于 STATCOM 电流调制的装置对扩建后的系统的次同步振荡抑制。

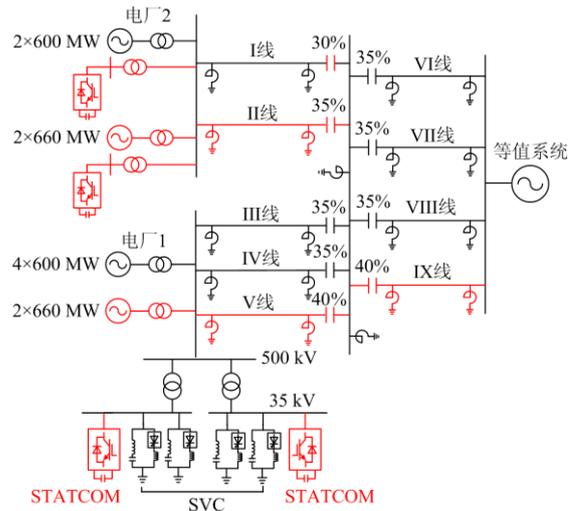


图 1 串补系统扩建后结构图

Fig. 1 Diagram of the expanded system with series compensation

2 系统中各元件复频域导纳矩阵模型

本文用基于 CPCM 的复转矩系数法来分析该实际系统的次同步振荡特性。故本小节主要介绍系统中常见元件如同步发电机、变压器、输电线路、SVC 以及 STATCOM 模型的复频域端口导纳矩阵。

2.1 同步发电机复频域端口导纳矩阵模型

非待研究发电机组采用 6 绕组电气模型, 不计

励磁系统和 PSS 的影响, 考虑轴系动态, 发电机在其自身转子坐标系下的状态空间模型为

$$\begin{cases} p\mathbf{X}_G = \mathbf{A}_{Gdq}\mathbf{X}_G + \mathbf{B}_{Gdq}\mathbf{U}_{Gdq} \\ \mathbf{I}_{Gdq} = \mathbf{C}_{Gdq}\mathbf{X}_G \end{cases} \quad (1)$$

发电机 $dq0$ 坐标系与系统同步坐标系 $xy0$ 之间的关系如图 2 所示。

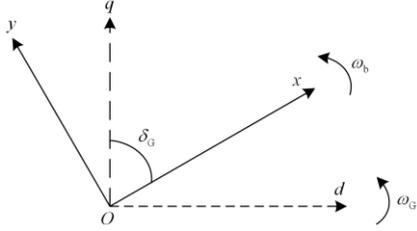


图 2 机网坐标关系相量图

Fig. 2 Relation of dq and xy co-ordinates

可以得到同步发电机坐标系 $dq0$ 与系统同步坐标系 $xy0$ 间相互的转换关系式, 然后对其进行线性化, 得到式(2)。

$$\begin{bmatrix} \Delta X_d \\ \Delta X_q \end{bmatrix} = T_0 \begin{bmatrix} \Delta X_x \\ \Delta X_y \end{bmatrix} + T'_0 \begin{bmatrix} X_{x0} \\ X_{y0} \end{bmatrix} \Delta \delta_G \quad (2)$$

式中: ΔX_d 、 ΔX_q 和 ΔX_x 、 ΔX_y 可为电压或者电流等物理量的小信号变量; 系数 T_0 、 T'_0 见式(3)。

$$\begin{aligned} T_0 &= \begin{bmatrix} \sin \delta_{G0} & -\cos \delta_{G0} \\ \cos \delta_{G0} & \sin \delta_{G0} \end{bmatrix} \\ T'_0 &= \begin{bmatrix} \cos \delta_{G0} & \sin \delta_{G0} \\ -\sin \delta_{G0} & \cos \delta_{G0} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

经坐标转换矩阵变换后, 得到

$$\begin{cases} p\mathbf{X}_G = \mathbf{A}_{Gxy}\mathbf{X}_G + \mathbf{B}_{Gxy}\mathbf{U}_{Gxy} \\ \mathbf{I}_{Gxy} = \mathbf{C}_{Gxy}\mathbf{X}_G \end{cases} \quad (4)$$

化简得到端口导纳矩阵:

$$\mathbf{Y}_G = \mathbf{C}_{Gxy}(\mathbf{p}\mathbf{I} - \mathbf{A}_{Gxy})^{-1}\mathbf{B}_{Gxy} \quad (5)$$

待研究发电机组不考虑轴系动态, 其复频域方程为

$$\begin{cases} \mathbf{G}_G\mathbf{X}_G = \mathbf{H}_G\mathbf{U}_{Gdq} + \mathbf{M}_G\Delta\omega \\ \mathbf{I}_{Gdq} = \mathbf{N}_G\mathbf{X}_G \end{cases} \quad (6)$$

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

$\mathbf{U}_{Gdq} = [\Delta u_d \ \Delta u_q]^T$; $\mathbf{I}_{Gdq} = [\Delta i_d \ \Delta i_q]^T$; $\Delta\omega$ 为机组发电机质量块电气转速偏差; \mathbf{G}_G 、 \mathbf{H}_G 、 \mathbf{N}_G 为微分算子的函数。

2.2 变压器模型

变压器采用电感-电阻串联的模型, 其示意图如

图 3 所示。



图 3 变压器模型示意图

Fig. 3 Diagram of transformer model

可以得到变压器的端口导纳矩阵为

$$\mathbf{Y}_T = \left(\begin{bmatrix} r_T & 0 \\ 0 & r_T \end{bmatrix} + x_T \begin{bmatrix} p & -1 \\ 1 & p \end{bmatrix} \right)^{-1} \quad (7)$$

2.3 输电网络模型

SSO 分析中的输电线路元件一般作为集中参数模型考虑(正序网络), 主要有交流输电线路模型(考虑线路充电电容)和串联补偿电容支路, 简化示意图如图 4 和图 5 所示。

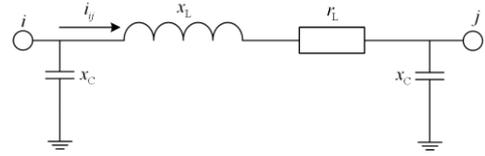


图 4 输电线路模型

Fig. 4 Transmission line model

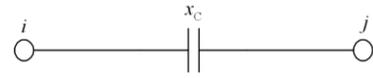


图 5 串联补偿电容模型

Fig. 5 Series compensation capacitor model

可以得到输电线路与电容的端口导纳矩阵为

$$\mathbf{Y}_{RL} = \left(\begin{bmatrix} r_L & 0 \\ 0 & r_L \end{bmatrix} + x_L \begin{bmatrix} p & -1 \\ 1 & p \end{bmatrix} \right)^{-1} \quad (8)$$

$$\mathbf{Y}_C = \frac{1}{x_C} \begin{bmatrix} p & -1 \\ 1 & p \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.4 SVC 模型

SVC 由晶闸管控制电抗器(TCR)和并联的固定电容器(FC)组成, 其中具有次同步振荡抑制能力的 TCR 部分控制过程如图 6 所示。

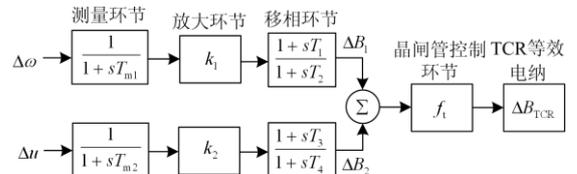


图 6 TCR 控制过程

Fig. 6 Control process of TCR

xy 坐标系下 SVC 的复频域模型推导过程可参见文献[28], 结果可表示为

$$\mathbf{I}_{SVC} = \mathbf{I}_{TCR} + \mathbf{I}_{FC} = \mathbf{Y}_{SVC} \mathbf{U} + \mathbf{Y}'_{TCR} \Delta\omega \quad (10)$$

式中, $\mathbf{Y}_{SVC} = \mathbf{Y}_{TCR} + \mathbf{Y}_{FC}$ 。

2.5 STATCOM 模型

STATCOM^[29-30]可以通过变压器接在发电机高压母线侧, 如图 7 所示。

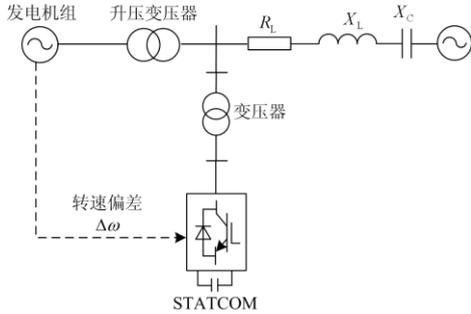


图 7 STATCOM 接入系统图

Fig. 7 Connection diagram of system with STATCOM

其主电路采用 dq 解耦控制, d 轴电流用来控制直流电容上的电压维持额定值, q 轴电流控制母线节点的电压, 如图 8 所示。该节点电压的变化必将伴随着 STATCOM 的输出电流产生一个附加值, 进入邻近发电机产生附加转矩。若以发电机转速偏差作为 STATCOM 的输入信号, 经过适当的处理, 使得该附加转矩在发电机轴系自然振荡频率处呈制动状态, 即可抑制系统的次同步振荡。

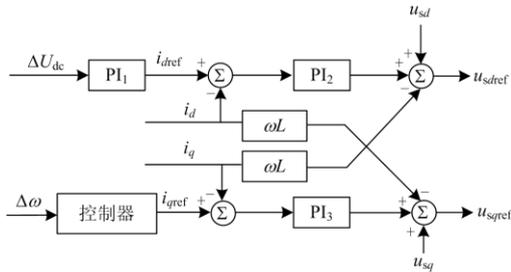


图 8 STATCOM 控制框图

Fig. 8 Control block diagram of STATCOM

以电厂 1 配备的 STATCOM 为例, 其转速反馈控制如图 9 所示, 共有六个通道, 分别对应两种型号机组的六个不同模式。每个通道中的带通滤波器允许对应模式频率的转速信号通过, 而带阻滤波器将其余模式频率信号阻隔。再将按模式分离的信号做比例、移相处理得到相应的指令值, 控制端口产生含次同步频率的电压分量, 从而注入对应频率的补偿电流到机组, 抑制次同步振荡。

STATCOM 的小信号模型可参见文献[31], 考虑附加发电机转速偏差控制后, 其在 xy 坐标系下的

状态空间模型可以写为

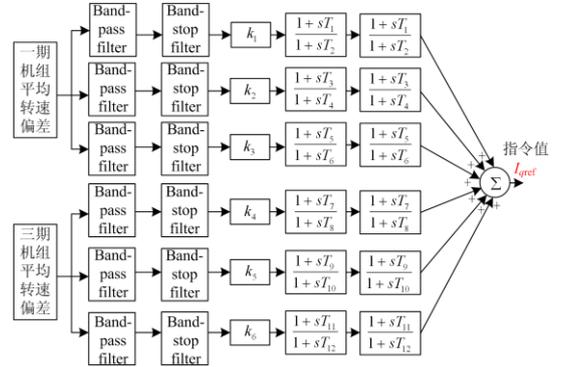


图 9 转速反馈控制框图

Fig. 9 Block diagram of rotate speed feedback control

$$\begin{cases} p\mathbf{X}_{STA} = \mathbf{A}_{STA} \mathbf{X}_{STA} + \mathbf{B}_{STA} \mathbf{U}_{STA} + \mathbf{D}\Delta\omega \\ \mathbf{I}_{STA} = \mathbf{C}_{STA} \mathbf{X}_{STA} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{U}_{STA} = [\Delta U_x \quad \Delta U_y]^T$ 为装置出口电压; $\Delta\omega$ 为对应火电机组的状态变量, 如式(12)所示。

$$\Delta\omega = \mathbf{F}\mathbf{X}_G \quad (12)$$

与式(4)联立可以得到:

$$\Delta\omega = \mathbf{F}(\mathbf{p}\mathbf{I} - \mathbf{A}_{Gxy})^{-1} \mathbf{B}_{Gxy} \mathbf{U}_{Gxy} \quad (13)$$

将上式代入式(11), 得到

$$\mathbf{I}_{STA} = \mathbf{C}_{STA} (\mathbf{p}\mathbf{I} - \mathbf{A}_{STA})^{-1} \mathbf{B}_{STA} \mathbf{U}_{STA} + \mathbf{C}_{STA} (\mathbf{p}\mathbf{I} - \mathbf{A}_{STA})^{-1} \mathbf{D}\mathbf{F} (\mathbf{p}\mathbf{I} - \mathbf{A}_{Gxy})^{-1} \mathbf{B}_{Gxy} \mathbf{U}_{Gxy} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{C}_{STA} (\mathbf{p}\mathbf{I} - \mathbf{A}_{STA})^{-1} \mathbf{D}\mathbf{F} (\mathbf{p}\mathbf{I} - \mathbf{A}_{Gxy})^{-1} \mathbf{B}_{Gxy}$ 构成了 STATCOM 端节点与发电机端节点的互导纳; $\mathbf{C}_{STA} (\mathbf{p}\mathbf{I} - \mathbf{A}_{STA})^{-1} \mathbf{B}_{STA}$ 构成了 STATCOM 端节点的自导纳。

3 基于 CPCM 的复转矩系数法

3.1 发电机机械复转矩系数计算

发电机组机械复转矩系数的求解仅与轴系的机械动态方程有关, 求解可以参考文献[32], 结果为

$$-\Delta T_e = K_M(p) \Delta\delta_G \quad (15)$$

3.2 发电机电气复转矩系数计算

假设系统共计 N 个独立节点, 将待研究发电机编号为 1, 其余节点任意编号, 基于上节给出的各元件复频域导纳模型, 用支路追加的方式形成全网络的复频域方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{1xy(2 \times 1)} \\ \mathbf{0}_{(2(N-1) \times 1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{GG(2 \times 2)} & \mathbf{Y}_{GS(2 \times 2(N-1))} \\ \mathbf{Y}_{SG(2(N-1) \times 2)} & \mathbf{Y}_{SS(2(N-1) \times 2(N-1))} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{1xy(2 \times 1)} \\ \mathbf{U}_{S(2(N-1) \times 1)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{I}_{1xy(2 \times 1)}$ 、 $\mathbf{U}_{1xy(2 \times 1)}$ 为待研究发电机组端口电压、电流增广矩阵; $\mathbf{U}_{S(2(N-1) \times 1)}$ 为其余网络节点电压增广矩阵。

对其进行化简可得到网络部分相对于节点 1 的导纳矩阵:

$$\mathbf{I}_{1xy} = \mathbf{Y}_{sl} \mathbf{U}_{1xy} = (\mathbf{Y}_{GG} - \mathbf{Y}_{GS} \mathbf{Y}_{SS}^{-1} \mathbf{Y}_{SG}) \mathbf{U}_{1xy} \quad (17)$$

联立式(2)、式(3)、式(6)和式(17), 得

$$\mathbf{X}_G = \mathbf{A} \mathbf{A}_G \Delta \delta_G \quad (18)$$

其中:

$$\mathbf{A} \mathbf{A}_G = (\mathbf{H}_G (\mathbf{T}_0 \mathbf{U}_{xy0} - \mathbf{T}_0 \mathbf{Y}_{sl}^{-1} \mathbf{T}_0^{-1} \mathbf{T}_0' \mathbf{I}_{xy0}) + \frac{\mathbf{M}_G \times p}{\omega_b}) \cdot (\mathbf{G}_G - \mathbf{H}_G \mathbf{T}_0 \mathbf{Y}_{sl}^{-1} \mathbf{T}_0^{-1} \mathbf{N}_G)^{-1} \quad (19)$$

而待研究发电机的电磁转矩为

$$\Delta T_e = \mathbf{M}_e \mathbf{X}_G \quad (20)$$

其中:

$$\mathbf{M}_e = [i_{q0}(x_q - x_d) \quad i_{d0}x_q - i_{d0}x_d + i_{f0}x_{ad} \quad i_{q0}x_{ad} \\ i_{q0}x_{ad} \quad -i_{d0}x_{aq} \quad -i_{d0}x_{aq}]$$

联立式(18)、式(20)可以将电磁转矩写为

$$\Delta T_e = \mathbf{M}_e \mathbf{A} \mathbf{A}_G \Delta \delta_G = \mathbf{K}_E(p) \Delta \delta_G \quad (21)$$

令 $p = j\xi$, 即可算得待研究发电机组的机械复转矩系数和电气复转矩系数, 如式(22)和式(23)所示。

$$\mathbf{K}_M(j\xi) = \mathbf{K}_m(\xi) + j\xi \mathbf{D}_m(\xi) \quad (22)$$

$$\mathbf{K}_E(j\xi) = \mathbf{K}_e(\xi) + j\xi \mathbf{D}_e(\xi) \quad (23)$$

式中: $\mathbf{K}_m(\xi)$ 、 $\mathbf{K}_e(\xi)$ 分别为机械弹性系数和电气弹性系数; $\mathbf{D}_m(\xi)$ 、 $\mathbf{D}_e(\xi)$ 分别为机械阻尼系数和电气阻尼系数。

在轴系自然振荡频率附近, 若综合阻尼即机械阻尼系数与电气阻尼系数之和小于零, 系统就会发生不稳定的次同步振荡, 即由复转矩系数法得到的判据为

$$[\mathbf{D}_m(\xi) + \mathbf{D}_e(\xi)]_{[\mathbf{K}_m(\xi) + \mathbf{K}_e(\xi) = 0]} < 0 \quad (24)$$

上述过程使得在复杂系统中能较为方便地使用复转矩系数法对机组轴系稳定性进行判断, 简化了计算过程。

4 算例分析

4.1 特征值分析

对于本文第一部分介绍的实际系统, 由于新增了发电机组和串补线路, 可能出现新的振荡问题。这里选取一种工况, 具体为所有机组半载出力, 串补 III 线退出运行, 没有抑制装置投运。计算其特征

值^[33]如表 1 所示。

由表 1 可知, 扩建后系统除了原系统本身存在的一/二期机组模态 3(27.8 Hz), 还可能增加新的振荡模态——三期机组模态 2(24.9 Hz), 为不稳定模式。此时基于 SVC 的原抑制装置的抑制效果可能不足, 需要研究基于 STATCOM 电流调制的装置增强对扩建后的系统的抑制效果。

表 1 电厂 1 机组振荡模态

Table 1 Oscillation modes of generator for the first power plant

电厂 1	模态 1	模态 2	模态 3
一/二期	$-0.06 \pm j13.3 \times 2\pi$	$-0.03 \pm j22.7 \times 2\pi$	$0.25 \pm j27.8 \times 2\pi$
三期	$-0.04 \pm j19.9 \times 2\pi$	$0.01 \pm j24.9 \times 2\pi$	$-0.03 \pm j42.6 \times 2\pi$

4.2 SVC 抑制效果研究

4.2.1 复转矩系数分析

基于上述工况, 在抑制装置仅接入 SVC 的情形下, 利用基于 CPCM 的复转矩系数法对电厂 1 机组的 SSO 阻尼特性进行分析。计算一期机组和三期机组的复转矩系数如图 10 和图 11 所示。图(a)是机组机械弹性系数和电气弹性系数, 图(b)为机组机械阻尼系数和电气阻尼系数, 机械阻尼系数用实际值的负值表示, 便于判断系统总阻尼的大小。

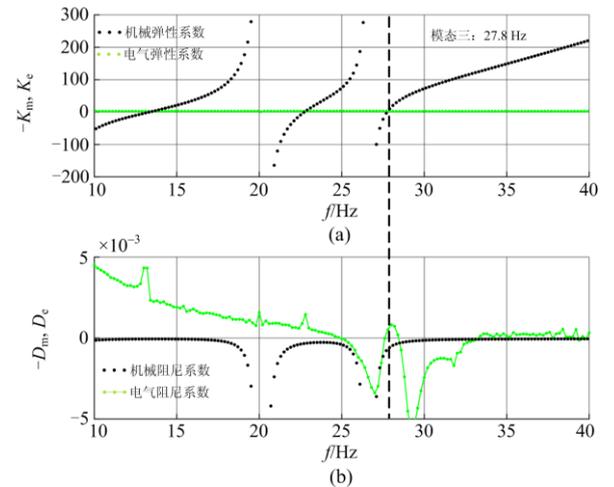


图 10 一期机组复转矩系数

Fig. 10 Complex torque coefficient of first-stage generator

由图 10 和图 11 可知, 当仅接入 SVC 抑制装置时, 一期机组三个模态均为电气正阻尼, 机械阻尼均为弱的正阻尼, 可以得到综合阻尼为正, 一期机组均为稳定模态; 三期机组模态 2 为电气负阻尼, 该模态下的机械正阻尼较小, 相加得到综合阻尼为较小的负阻尼, 仍然存在振荡的风险。即 SVC 可以抑制一期机组的振荡模态, 但是无法抑制新增机组的振荡模态。

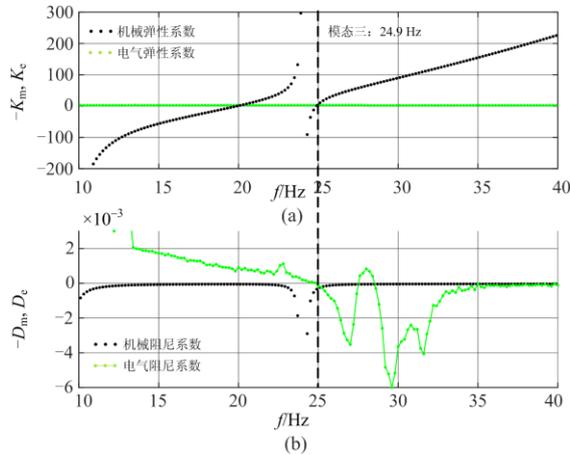


图 11 三期机组复转矩系数

Fig. 11 Complex torque coefficient of third-stage generator

4.2.2 时域分析

采用 PSCAD/EMTDC 软件建立该串补系统的全电磁暂态仿真模型,来验证上述的电气阻尼分析。在所有机组半载出力,串补Ⅲ线退出运行,抑制装置仅投运 SVC 的情形下,设置扰动 4 s 时串补 IV 线首端单相瞬时接地短路,故障持续 0.1 s, 1 s 后线路重合闸。当振荡发生时,由于机电耦合作用,轴系转速上会叠加振荡分量,故在时域分析中均使用轴系模态转速偏差来判断稳定性。一期和三期机组的模态转速偏差如图 12 和图 13 所示。

由仿真结果可以看出,在抑制装置仅接入 SVC 时:一期机组在受到扰动之后,各模态转速偏差会上升至一个较大值,扰动消除后,由于各模态综合阻尼为正,转速偏差迅速收敛;三期机组模态 2 综合阻尼为较弱的负阻尼,在扰动消除之后,模态转速缓慢发散,14 s 后超过 0.4 rad/s,其余模态收敛。

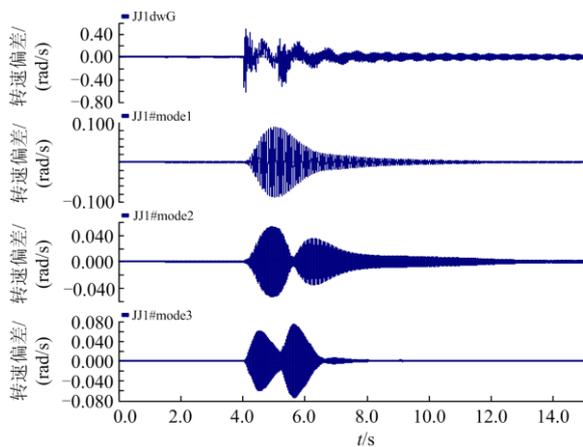


图 12 SVC 接入时一期机组模态转速偏差

Fig. 12 Shaft modal speed deviation of first-stage generator with SVC

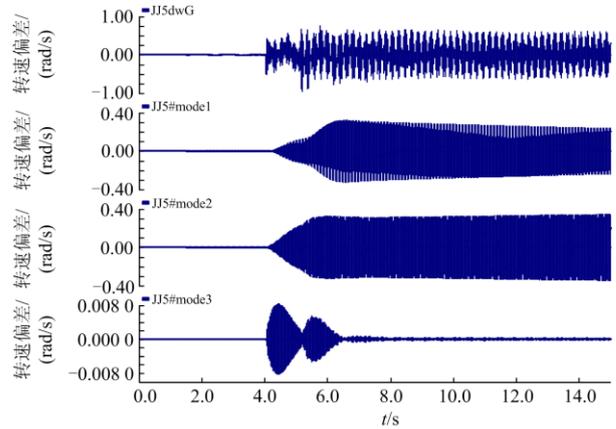


图 13 SVC 接入时三期机组模态转速偏差

Fig. 13 Shaft modal speed deviation of third-stage generator with SVC

证明 SVC 抑制装置可以较好地抑制一期机组的轴系振荡,但是对于新增三期机组的振荡模态,没有起到理想的抑制效果。

4.3 STATCOM 抑制效果研究

4.3.1 STATCOM 参数整定过程

转速反馈通道中有两个关键参数需要合理设计,分别为比例参数 k 和相移参数 φ 。

比例参数 k 的设计要遵循两个原则:(1)避免在短路故障时,比例系数过大,造成输出限幅;(2)在原则一的前提下尽量增大比例系数,加快振荡抑制。实际测定时,选取多种严重工况下, k 可取最大值的 90%,留有 10%的裕度。

相移参数是根据小信号测试法,在特定工况下测量出能够对各模态起抑制作用的相移角 φ 的取值范围。根据实际电网,选取常用的电网结构和典型的工况,记录不同情形下的相移范围,然后选取其中心点作为最后的优化参数。

由 STATCOM 产生的附加转矩对应的电气阻尼可以用式(25)进行计算。

$$D_e(\omega) = \text{Re} \left(\frac{\Delta \dot{T}_e}{\Delta \dot{\omega}} \right) \quad (25)$$

从式(25)可知,当 $\Delta \dot{T}_e$ 和 $\Delta \dot{\omega}$ 之间的相角在 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 时,该附加电磁转矩均能提供正阻尼。

假定轴系自然振荡频率为 f_m ,用一个幅值很小的电流模拟转速反馈通道得到的电流 Δi_{qref} 作为指令值。

$$\Delta i_{qref} = \Delta I \sin(2\pi f_m t + \theta_0) \quad (26)$$

测得此时该模态频率下电磁转矩和电流指令值的相位差为

$$\varphi_1 = \angle \frac{\Delta \dot{I}_e}{\Delta \dot{I}_{qref}} \quad (27)$$

同时根据滤波器的传递函数计算出滤波器在该模态下的相移 φ_2 。则根据式(27)即可解得需要补偿的相移角 φ 的取值范围。

$$-\pi/2 < (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi) < \pi/2 \quad (28)$$

利用形如 $G(1+sT_a)/(1+sT_b)$ 的超前滞后环节, 采用式(28)来确定相角补偿的时间常数。

其中增益系数 G 是为了使相位补偿环节的模保持为单位值。

$$\begin{cases} a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \\ T_a = \frac{1}{2\pi f_m \sqrt{a}} \\ T_b = aT_a \end{cases} \quad (29)$$

根据上述方法确定第一部分介绍的实际系统中 STATCOM 六个通道的比例参数 k 、相移角 φ 以及时间常数, 如表 2 所示。

表 2 STATCOM 的整定参数

Table 2 Setting parameter for STATCOM

自然振荡频率/Hz	k	$\varphi /(^{\circ})$	T_a/s	T_b/s
13.3	0.6	20	1.709×10^{-2}	8.379×10^{-3}
22.7	0.6	10	8.356×10^{-3}	5.883×10^{-3}
27.8	0.5	10	6.823×10^{-3}	4.804×10^{-3}
19.9	0.4	20	1.142×10^{-2}	5.600×10^{-3}
24.9	0.8	20	9.128×10^{-3}	4.476×10^{-3}
42.6	0.1	20	5.336×10^{-3}	2.616×10^{-3}

4.3.2 复转矩系数分析

基于上述工况, 在抑制装置仅有 STATCOM 接入的情形下, 计算一期机组和三期机组的复转矩系数如图 14 和图 15 所示。

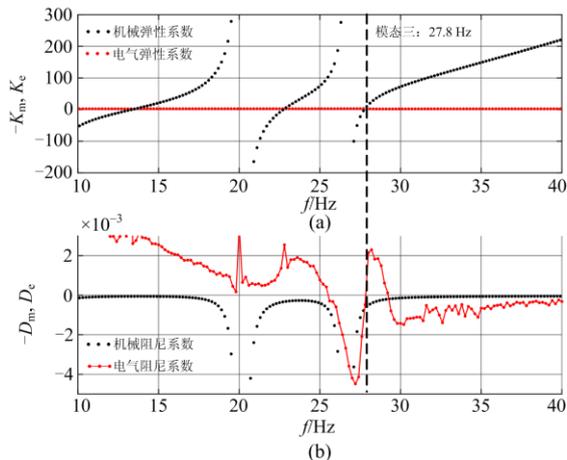


图 14 一期机组复转矩系数

Fig. 14 Complex torque coefficient of first-stage generator

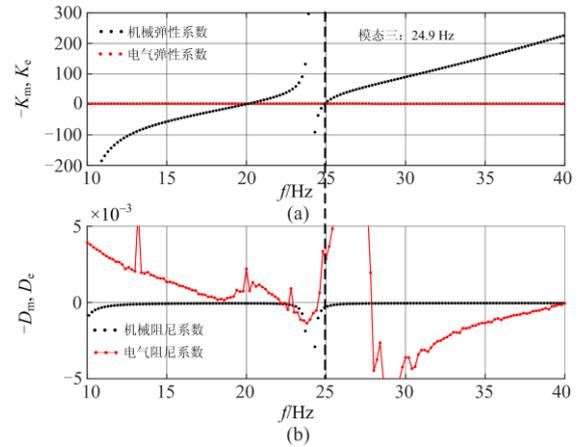


图 15 三期机组复转矩系数

Fig. 15 Complex torque coefficient of third-stage generator

由图可知, 当仅接入 STATCOM 时, 一期机组三个模态的机械阻尼和电气阻尼均为正值, 故综合阻尼为正, 三期机组模态 2 电气阻尼增加至正值, 机械阻尼保持为弱正阻尼, 综合阻尼为正, 同时消除了原有模态和新增模态的振荡风险, 阻尼增加明显。

4.3.3 时域分析

利用电磁暂态仿真, 在所有机组半载出力, 串补 III 线退出运行, 抑制装置仅投运 STATCOM 的情形下, 设置扰动 4 s 时串补 IV 线首端单相瞬时接地短路, 故障持续 0.1 s, 1 s 后线路重合闸。一期和三期机组的模态转速偏差如图 16 和图 17 所示。

由仿真结果可以看出, 在 STATCOM 抑制装置接入时, 一期与三期机组各个模态均为收敛模态, 与综合阻尼均为正值的分析相一致。其中三期机组模态 2 在只有 SVC 装置抑制时呈缓慢发散, 而此时呈收敛状态, 证明 SVC 装置无法将该模态阻尼提升至正值, 而 STATCOM 装置可以明显改善之。原因是 SVC 装置只有一期机组的抑制通道, 只能对一期

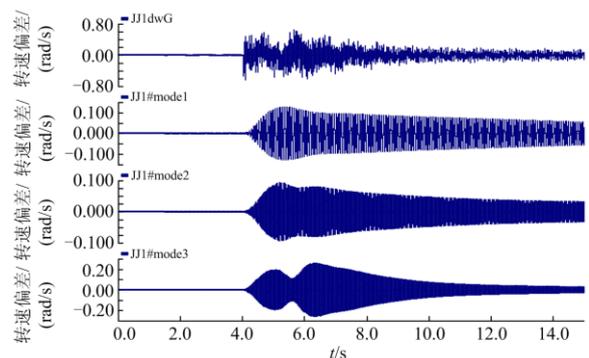


图 16 STATCOM 接入时一期机组模态转速偏差

Fig. 16 Shaft modal speed deviation of first-stage generator with STATCOM

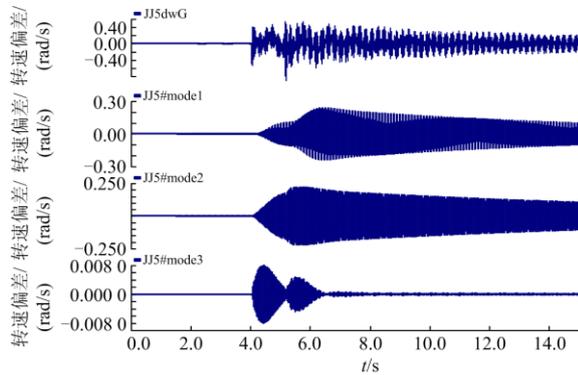


图 17 STATCOM 接入时三期机组模态转速偏差

Fig. 17 Shaft modal speed deviation of third-stage generator with STATCOM

机组起作用，而 STATCOM 装置含有电厂 1 所有机组的抑制通道，能够抑制所有机组的振荡模态。

计算该工况特征值如表 3 所示。由表 3 中结果可知：STATCOM 抑制装置接入后，电厂 1 中所有机组的轴系振荡模态实部均为负值，消除了原来的不稳定模态。

表 3 STATCOM 接入后电厂 1 机组振荡模态

Table 3 Oscillation modes of generator for the first power plant with STATCOM

电厂 1	模态 1	模态 2	模态 3
一/二期	$-0.13 \pm j13.3 \times 2\pi$	$-0.06 \pm j22.7 \times 2\pi$	$-0.05 \pm j27.8 \times 2\pi$
三期	$-0.09 \pm j19.9 \times 2\pi$	$-0.02 \pm j24.9 \times 2\pi$	$-0.03 \pm j42.6 \times 2\pi$

本节利用基于 CPCM 的复转矩系数法分析了该实际系统的 SSO 特性，以及利用抑制装置成功地消除了系统 SSO 风险，该分析结果与时域仿真以及特征值分析结果一致。

5 结论

本文推导了电力系统中常见元件以及两种经过改造后具有次同步振荡抑制能力的设备——SVC 装置和 STATCOM 装置的复频域端口等效导纳矩阵，重点分析了基于 STATCOM 电流调制装置的抑制原理，同时对其中涉及的关键参数——比例增益以及补偿相移给出了详细的整定过程，便于在实际系统中设计实现。

同时介绍了一种基于 CPCM 的复转矩系数法的实现过程，既考虑了其他发电机的轴系动态，又简化了计算过程。

最后采用该方法对实际串补送出系统作了 SSO 特性分析以及 SVC 和 STATCOM 两种装置对系统

次同步振荡抑制效果研究。结果表明，当系统中存在多种型号的机组，各机组对应多个轴系模态时，可在装置中设置相应的抑制通道，通道之间互不干扰，各自增加电气阻尼，起到良好的抑制效果。该方案可为系统中存在的多机多模态次同步振荡问题的解决提供指导。

参考文献

- [1] 张学延, 屈杰, 何国安, 等. 大型汽轮发电机组非典型故障分析[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 284-292, 300. ZHANG Xueyan, QU Jie, HE Guoan, et al. Case analysis of several atypical faults of large turbo-generator set[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 284-292, 300.
- [2] BALLANCE J W, GOLDBERG S. Subsynchronous resonance in series compensated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1973, 92(5): 1649-1658.
- [3] 文劲宇, 孙海顺, 程时杰. 电力系统的次同步振荡问题[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 1-4. WEN Jinyu, SUN Haishun, CHENG Shijie. Subsynchronous oscillation in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 1-4.
- [4] 刘革明, 白杨, 任祖怡, 等. 次同步振荡监测控制系统的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 131-136. LIU Geming, BAI Yang, REN Zuyi, et al. Research and implementation on monitoring and controlling system of sub synchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 131-136.
- [5] 张天翼, 王海风. 风电并入弱交流系统引发次同步振荡的研究方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 177-187. ZHANG Tianyi, WANG Haifeng. Research methods for subsynchronous oscillation induced by wind power under weak AC system: a review[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 177-187.
- [6] 刘世宇, 谢小荣, 王仲鸿. 我国火电基地串补输电系统的次同步谐振问题[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 5-8, 19. LIU Shiyu, XIE Xiaorong, WANG Zhonghong. SSR problem in compensated transmission system of thermal power bases in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 5-8, 19.
- [7] 杨尉薇, 朱玲, 李威, 等. 风火打捆直流送出系统次同步振荡及传播特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 58-64. YANG Weiwei, ZHU Ling, LI Wei, et al. Study on subsynchronous oscillation and propagation characteristics of wind-fire bundled sending system[J]. Power System

- Protection and Control, 2019, 47(20): 58-64.
- [8] 杨博闻, 占颖, 谢小荣, 等. 双馈风电场接入串补输电系统引发次同步谐振的研究模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 120-126.
YANG Bowen, ZHAN Ying, XIE Xiaorong, et al. A study model for subsynchronous resonance in DFIG based wind farms connected to a series-compensated power system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 120-126.
- [9] 张航, 滕予非, 王晓茹, 等. 计及并联补偿高抗的电力系统对次同步振荡的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 25-34.
ZHANG Hang, TENG Yufei, WANG Xiaoru, et al. Analysis of sub-synchronous oscillation of power system with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 25-34.
- [10] 王磊, 张凌博. 多逆变器并网等值建模及谐振抑制优化[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 19-29.
WANG Lei, ZHANG Lingbo. Equivalent modeling of multi-inverters connected to the grid and optimization of resonance suppression[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 19-29.
- [11] 刘一涛, 张楠, 高靖, 等. 应用于高压直流换流站近区机组的次同步振荡阻尼控制器研究[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 181-187.
LIU Yitao, ZHANG Nan, GAO Jing, et al. Study on sub-synchronous oscillation damping controller for near-area unit of HVDC converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3): 181-187.
- [12] 于弘洋, 戴朝波, 孙佳安, 等. 基于 FACTS 的次同步振荡抑制器对变压器工作特性影响研究[J]. 高压电器, 2021, 57(11): 148-155.
YU Hongyang, DAI Chaobo, SUN Jia'an, et al. Research on influence of FACTS based subsynchronous oscillation suppressor on operating characteristics of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11): 148-155.
- [13] CANAY I M. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine, part I[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10): 3630-3638.
- [14] 黄璐, 李娟, 刘晓建. 基于 PSCAD/EMTDC 的复转矩系数法的时域实现及对电气阻尼影响的研究[J]. 传感器世界, 2018, 24(2): 13-19.
HUANG Lu, LI Juan, LIU Xiaojian. Realization of complex torque coefficient method in time domain based on PSCAD/EMTDC and research on the influence on electrical damping[J]. Sensor World, 2018, 24(2): 13-19.
- [15] 王晋, 郭春林, 肖湘宁, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的复转矩系数法的实现[J]. 华东电力, 2010, 38(12): 1854-1857.
WANG Jin, GUO Chunlin, XIAO Xiangning, et al. Realization of PSCAD /EMTDC based complex torque coefficient approach[J]. East China Electric Power, 2010, 38(12): 1854-1857.
- [16] 吴俊勇, 陈晓华, 汪馥英, 等. 复杂电力系统发电机轴系扭振特性的快速计算[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(4): 6-8, 20.
WU Junyong, CHEN Xiaohua, WANG Fuying, et al. Dramatic calculation of turbo-generator shaft torsional vibration in complex AC/DC power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(4): 6-8, 20.
- [17] 高本锋, 王晓, 梁纪峰, 等. 混合型统一潮流控制器抑制风电次同步振荡控制策略[J]. 电力建设, 2021, 42(9): 53-64.
GAO Benfeng, WANG Xiao, LIANG Jifeng, et al. Control strategy of hybrid unified power flow controller to suppress wind power sub-synchronous oscillation[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9): 53-64.
- [18] 任树东, 王绍德, 胡春涛, 等. 托克托电厂阻塞滤波器优化设计[J]. 南方电网技术, 2015, 9(3): 87-93.
REN Shudong, WANG Shaode, HU Chuntao, et al. Optimal design of blocking filter in Tuoketuo power plant[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(3): 87-93.
- [19] 高本锋, 赵成勇, 肖湘宁, 等. 高压直流输电系统附加次同步振荡阻尼控制器的设计与实现[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 501-506.
GAO Benfeng, ZHAO Chengyong, XIAO Xiangning, et al. Design and implementation of SSDC for HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 501-506.
- [20] 张帆, 徐政. 利用 TCR 抑制发电机次同步谐振的仿真研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1692-1697.
ZHANG Fan, XU Zheng. Thyristor-controlled reactor used for damping subsynchronous resonance[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1692-1697.
- [21] 葛俊, 童陆园, 耿俊成, 等. TCSC 抑制次同步谐振的机理研究及其参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 25-29.
GE Jun, TONG Luyuan, GENG Juncheng, et al. The mechanism research of SSR mitigation by TCSC and its parameter design[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 25-29.
- [22] 于鸿儒, 苏建徽, 郑林, 等. 储能逆变器并网次同步谐振机理分析与抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 99-108.
YU Hongru, SU Jianhui, ZHENG Lin, et al. Mechanism

- analysis and suppression method of sub-synchronous resonance for energy storage inverter connecting to power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 99-108.
- [23] 杨京, 王彤, 毕经天, 等. 含直驱风电机组的电力系统次同步振荡鲁棒阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 56-65.
YANG Jing, WANG Tong, BI Jingtian, et al. Robust damping control of subsynchronous oscillation in power system with direct-drive wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 56-65.
- [24] 韩寒, 张聪. STATCOM 抑制电力系统次同步振荡的研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(2): 30-34.
HAN Han, ZHANG Cong. Research on damping sub-synchronous resonance in power system with STATCOM[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(2): 30-34.
- [25] 张智, 刘丽楠. STATCOM 在抑制次同步谐振及提高串补度的应用研究[J]. 电气技术, 2018, 19(11): 46-54.
ZHANG Zhi, LIU Linan. Research on the suppression of subsynchronous oscillation and the improvement of series compensation by STATCOM[J]. Electrical Engineering, 2018, 19(11): 46-54.
- [26] 邹红波, 柴涛, 鲍刚. 基于改进 BBO 算法的 SSSC 阻尼控制器优化设计[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(9): 1-7.
ZOU Hongbo, CHAI Tao, BAO Gang. Optimized design of SSSC damping controller based on improved BBO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(9): 1-7.
- [27] HARA T, KOBAYASHI N, TAKEI A, et al. Development of a damping analysis program for multi-generator power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 9(4): 1803-1810.
- [28] 朱鑫要, 孙海顺, 文劲宇, 等. 基于 CPCM 的复转矩系数法在复杂电力系统 SSR 问题研究中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 77-84, 11.
ZHU Xinyao, SUN Haishun, WEN Jinyu, et al. Application of complex torque coefficient basing on CPCM to SSR study of complex power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 77-84, 11.
- [29] 王冠青, 孙海顺, 朱鑫要, 等. STATCOM 附加电压控制抑制次同步谐振的理论和仿真[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 33-38.
WANG Guanqing, SUN Haishun, ZHU Xinyao, et al. Theory and simulation of STATCOM supplementary voltage control to damp subsynchronous resonance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 33-38.
- [30] SHEETAL C, PRITAM B, PRAVAT K R, et al. Load shedding strategy coordinated with storage device and D-STATCOM to enhance the microgrid stability[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 250-268.
- [31] 刘宇明, 黄碧月, 孙海顺, 等. SVG 与直驱风机间的次同步相互作用特性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2072-2079.
LIU Yuming, HUANG Biyue, SUN Haishun, et al. Study on subsynchronous interaction between D-PMSG-based wind turbines and SVG[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2072-2079.
- [32] 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.
- [33] 王一凡, 赵成勇. 混合型风电场经 MMC-HVDC 送出系统的振荡模式分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 18-26.
WANG Yifan, ZHAO Chengyong. Analysis of oscillation modes of a hybrid-based wind farm transmitted through MMC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 18-26.

收稿日期: 2021-07-07; 修回日期: 2021-08-25

作者简介:

毛俞杰(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统的稳定与控制; E-mail: yujiemao@hust.edu.cn

孙海顺(1971—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与数字仿真, FACTS、舰船电力系统等。E-mail: haishunsun@hust.edu.cn

(编辑 姜新丽)