

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201644

# 线路模型对仿真分析串补次同步振荡现象的影响分析

郭劲东<sup>1</sup>, 李云阁<sup>2</sup>, 王敏<sup>3</sup>, 付周兴<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100; 3. 国网陕西省电力公司经济技术研究院, 陕西 西安 710075)

**摘要:** 次同步振荡是一种严重威胁电力系统安全稳定运行的故障, 围绕其产生机理与抑制措施, 已经开展了一系列研究工作。但是, 关于不同线路模型对仿真分析的影响, 并未有相关文献介绍。为了探究在进行仿真分析时不同线路模型对分析结果的影响以及各自的分析适用范围, 通过比较不同线路模型的阻尼水平, 总结各线路模型对仿真分析串补次同步振荡现象的影响, 并使用电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 进行仿真验证。验证结果表明, 集中电感电阻模型、 $\pi$  模型、Bergeron 模型的阻尼水平相当, JMarti 模型所提供阻尼水平最大。在进行一般分析时, 可使用集中电感电阻模型以快速得出结论; 在涉及抑制装置设计的场合, 应谨慎使用 JMarti 模型。

**关键词:** 次同步振荡; ATP-EMTP; 线路模型; 仿真分析; 阻尼水平

## Influence analysis of line models on the simulation analysis of a series complement sub-synchronous oscillation phenomenon

GUO Jindong<sup>1</sup>, LI Yunge<sup>2</sup>, WANG Min<sup>3</sup>, FU Zhouxing<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;  
2. Electric Power Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710100, China;  
3. Economic Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** Sub-synchronous oscillation is a fault that seriously threatens the safe and stable operation of a power system, and research has been carried out around the generation mechanism and suppression measures. However, there is no related literature on the influence of different line models on simulation analysis. In order to explore this influence of different line models and their respective analysis application scope during simulation analysis, by comparing the damping levels of different line models the influence of each line model on the simulation analysis of series-compensated sub-synchronous oscillation is summarized. The electromagnetic transient simulation software ATP-EMTP is used for simulation verification. The results show that the damping levels of the concentrated inductor resistance model, the  $\pi$ -type model, and the Bergeron model are equivalent. The JMarti model as the most accurate model provides the largest damping level. When performing a simplified analysis, the concentrated inductor resistance model can be used to quickly draw conclusions; and in cases where refers to inhibit device design, the JMarti model can be used prudently.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U1766208).

**Key words:** sub-synchronous oscillation; ATP-EMTP; line model; simulation analysis; damping level

## 0 引言

次同步振荡是发电机和电网在一个或若干个次同步频率下发生显著能量交换的异常工况, 该种故障会引起汽轮发电机组轴系的运行疲劳甚至断裂,

对电力系统的安全稳定运行存在严重威胁<sup>[1]</sup>。

历史上首次次同步振荡事故是 1970 年发生在美国内华达州 Mohave 电厂<sup>[2]</sup>, 之后国外多地电厂均报告发生了类似故障<sup>[3]</sup>。此类事件引起了工程界与学术界的高度重视, IEEE 提出了两大标准研究模型<sup>[4-5]</sup>, 梳理了相关术语和符号<sup>[6-8]</sup>, 出版了专门的文献目录<sup>[9-12]</sup>。众多文献针对次同步振荡的发生机

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1766208)

理、分析方法与抑制措施做了大量研究。文献[13]提出了双馈风电场接入串补输电系统引发次同步振荡的等值模型, 利用时域仿真法研究分析了次同步振荡的产生机理、振荡特性以及抑制措施。文献[14]分析了风电汇集地区次同步振荡的特征, 并提出了相应的抑制措施。文献[15]研究了考虑并联高抗的电力系统对次同步振荡的影响。文献[16]提出了一种基于振荡发散速率的次同步振荡风电场精准切机策略。文献[17]对双馈风力发电机的轴系扭振特性进行了研究, 为解决风电串补次同步振荡提供了依据。文献[18]研究了汽轮发电机组参数对电气阻尼的影响。文献[19]借用静止同步补偿器配合共生有机体检索算法以增强风机并网系统的稳定性。文献[20]研究了 600 MW 超临界机组配气特性对轴系振动的影响。目前众多研究工作中未涉及不同线路模型对仿真分析的影响, 为了探究在进行仿真分析时不同线路模型对分析结果的影响, 本文通过对此不同线路模型的阻尼水平, 理论分析不同线路模型对仿真分析的影响, 然后基于 ATP-EMTP 电磁暂态仿真软件, 对理论分析结果进行仿真实验验证。

## 1 串补系统次同步振荡机理

串补系统次同步振荡的产生机理是: 系统的电气谐振频率 $f_E$ 与电机轴系的某一自然扭振模态频率 $f_i$ 之和等于或接近工频频率 $f_N$ , 即

$$f_E + f_i = f_N \quad (1)$$

此时系统阻尼呈弱阻尼或负阻尼状态, 发生机-电耦合振荡。

### 1.1 轴系自然扭振模态频率

轴系自然扭振模态频率仅与轴系机械参数相关。研究中一般忽略阻尼系数, 仅仅考虑转动惯量与刚度系数, 轴系无阻尼自由振动齐次方程组为

$$\mathbf{J} \frac{d^2 \boldsymbol{\theta}}{dt^2} + \mathbf{K} \boldsymbol{\theta} = 0 \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{J}$  为转动惯量矩阵;  $\mathbf{K}$  为刚度系统矩阵;  $\boldsymbol{\theta}$  为角位移列向量。

研究中采用多质量块模型, 对于其中第  $i$  个质量块, 其角位移为

$$\theta_i = A_i \sin(p_i t + \delta_i) \quad (3)$$

式中:  $\theta_i$  为角位移 ( $i=1,2,\dots,n$ );  $A_i$  为振幅;  $p_i$  为自然扭振模态角频率;  $\delta_i$  为初始相位 ( $i=1,2,\dots,n$ );  $t$  为时间。

对于 6 质量块电机轴系模型, 转动惯量矩阵  $\mathbf{J}$  与刚度系数矩阵  $\mathbf{K}$  分别如式(4)、式(5)所示。

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_1 & & & & & \\ & J_2 & & & & \\ & & J_3 & & & \\ & & & J_4 & & \\ & & & & J_5 & \\ & & & & & J_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{12} & -K_{12} & & & & \\ -K_{12} & K_{12} + K_{23} & -K_{23} & & & \\ & -K_{23} & K_{23} + K_{34} & -K_{34} & & \\ & & -K_{34} & K_{34} + K_{45} & -K_{45} & \\ & & & -K_{45} & K_{45} + K_{56} & -K_{56} \\ & & & & -K_{56} & K_{56} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $J_i$  表示第  $i$  个质量块的转动惯量 ( $i=1,2,3,4,5,6$ );  $K_{i,i+1}$  表示第  $i$  个与  $i+1$  个质量块之间轻弹簧的刚度系数。

联立式(2)、式(3)可得:

$$\mathbf{J}^{-1} \mathbf{K} = p^2 \quad (6)$$

式中:  $p^2$  为轴系自然扭振模态角频率矩阵的平方, 经过实对称矩阵变换及雅可比变换后, 由对角线元素便可确定次同步频率范围内的模态频率。

### 1.2 电气谐振频率

假设电气系统中电阻  $R$ 、电感  $L$ 、电容  $C$  为串联连接, 则电气谐振频率 $f_E$ 为

$$f_E = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} \left( 1 - \frac{R^2 C}{4L} \right)} \quad (7)$$

当电阻很小可忽略时, 则式(7)可简化为

$$f_E = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

仿真中, 通过改变  $C$  调整  $f_E$ , 使系统处于次同步振荡状态。

## 2 串补系统

所研究的电网工频频率  $f_N = 60$  Hz, 由同步电机、升压变压器、带串联补偿电容的输电线路与系统等效电源组成<sup>[21]</sup>。其中升压变压器变比为 26/500 kV, 低压侧电抗为 0.1136  $\Omega$ , 高压侧电抗为 14.01  $\Omega$ 。系统等效电源电压为 500 kV, 电源阻抗为 0.55+j12.61  $\Omega$ 。同步电机额定容量 892.4 MVA, 额定电压 26 kV。线路详细参数见本文 2.2 节, 串补电容值为待调参数。系统结构如图 1 所示。

### 2.1 同步电机参数

同步电机轴系模型有 6 个质量块, 轴系结构如图 2 所示。电机电气与机械参数分别见表 1、表 2。

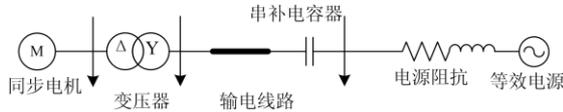


图 1 串补系统模型

Fig. 1 Series compensation system model



图 2 轴系模型示意图

Fig. 2 Shafting model diagram

表 1 同步电机电气参数

Table 1 Synchronous motor electrical parameters

参数名称	参数值
电枢电阻/p.u.	0.000
漏抗/p.u.	0.130
直轴同步电抗/p.u.	1.790
交轴同步电抗/p.u.	1.710
直轴暂态电抗/p.u.	0.169
交轴暂态电抗/p.u.	0.228
直轴次暂态电抗/p.u.	0.135
交轴次暂态电抗/p.u.	0.200
直轴开路暂态时间常数/s	4.300
交轴开路暂态时间常数/s	0.850
直轴开路次暂态时间常数/s	0.032
交轴开路次暂态时间常数/s	0.050

表 2 同步电机机械参数

Table 2 Synchronous motor mechanical parameters

质量块名称	转矩因数	转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	刚度系数 $K/(N \cdot m/rad)$
高压缸	0.30	1 166.62	46 704 000
中压缸	0.26	1 953.92	84 511 420
低压缸 A	0.22	10 783.35	125 906 700
低压缸 B	0.22	11 104.14	171 442 350
发电机	0	10 906.73	6 827 890
励磁机	0	429.70	

转矩因数为分配到每个气缸质量块上机械功率的分布因数，按照本文 1.1 节计算步骤，可得轴系自然扭振模态频率如表 3 所示。

## 2.2 线路参数

线路参数取自某 500 kV 输电线路<sup>[22]</sup>，具体参数见表 4，线路长度为 199.25 km。

杆塔几何尺寸如图 3 所示，其中： $V_{tower}$  为杆塔

表 3 轴系自然扭振模态频率

Table 3 Natural torsional vibration mode frequency of shafting

模态名称	轴系自然扭振模态频率/Hz
模态一	15.71
模态二	20.21
模态三	25.55
模态四	32.28
模态五	47.45

表 4 导线参数

Table 4 Wire parameters

参数名称	相导线	地线
导线内半径/cm	0.67	0
导线外半径/cm	1.185	0.742
直流电阻/ $(\Omega \cdot km^{-1})$	0.108	0.374
分裂间距/cm	45	0
水平分裂起始角/ $(^\circ)$	0	0
分裂数/根	4	0

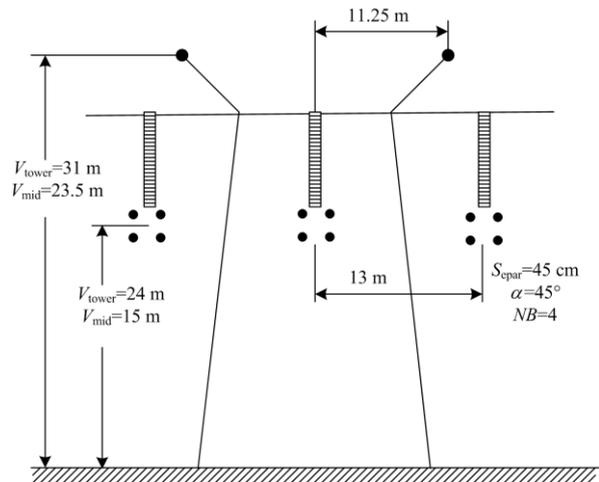


图 3 500 kV 输电线路杆塔几何图

Fig. 3 Geometry of 500 kV transmission line tower

处线路中心距地面的高度； $V_{mid}$  为档距中间处线路中心距地面的高度； $S_{split}$  为分裂导线间距离； $\alpha$  为某相导线束中，以导线束中心为原点，从水平线开始按逆时针方向旋转计算任意一根导线所处位置的角度； $NB$  为某相导线束中分裂导线的数量。

利用 ATP 计算线路电气参数，其结果如表 5 所示，计算中土壤电阻率取  $100 \Omega \cdot m$ 。

表 5 输电线路电气参数

Table 5 Electrical parameters of transmission line

参数名称	参数值
零序电阻/ $(\Omega \cdot km^{-1})$	0.204 5
正序电阻/ $(\Omega \cdot km^{-1})$	0.029 4
零序感抗/ $(\Omega \cdot km^{-1})$	0.783 2
正序感抗/ $(\Omega \cdot km^{-1})$	0.331 8

### 3 不同线路模型对振荡影响的机理分析

对于影响串补次同步振荡的决定性因素, 已有文献进行相关研究, 两大影响因素分别为电阻参数和串联补偿度。文献[23]指出随着系统中电阻参数增加, 互补次同步模态电气负阻尼减小, 振荡可得到有效抑制。文献[24]指出当补偿度小于临界补偿度时, 模态阻尼随补偿度增大而减小。本文研究将结合相关影响因素, 分析不同线路模型对仿真分析串补次同步振荡的影响。

常用的线路模型有 4 种<sup>[25]</sup>, 如下所述。

#### (1) $\pi$ 模型

$\pi$  模型即恒定集中参数模型, 模型中元件之间存在电磁耦合作用, 一般适用于短距离输电线路。

#### (2) 集中电感电阻模型

该种模型忽略  $\pi$  模型的对地电容, 将输电线路电气参数用电感、电阻等效, 一般适用于短距离输电线路, 但也可用于长线路条件下的近似理论分析。

#### (3) Bergeron 模型

Bergeron 模型即恒定分布参数模型, 为多相解耦后的模域模型, 考虑导线上波的传播过程, 参数不随频率变化, 适用于频率变化范围较小的长线路。

#### (4) JMarti 模型

JMarti 模型即频率相关分布参数模型, 该模型也考虑导线上波的传播过程, 但参数随频率变化, 适用于频率范围较大的电磁暂态过程模拟。

首先使用集中电感电阻模型粗略计算系统的电气谐振频率。图 1 所示串补系统中总感抗  $X$  为

$$X = X_d'' + X_T + X_L + X_S \quad (9)$$

式中:  $X_d''$  为发电机直轴次暂态电抗;  $X_T$  为变压器感抗;  $X_L$  为线路正序感抗;  $X_S$  为等效电源感抗。

串联补偿度  $K_c$  为

$$K_c = \frac{X_C}{X_L} \quad (10)$$

式中:  $X_C$  为串联补偿电容容抗;  $X_L$  为线路正序感抗,  $X_L = 66.11 \Omega$ 。

系统发生次同步振荡时, 轴系自然扭振模态频率、电气谐振频率、串联补偿度理论计算结果如表 6 所示。

实际工程中,  $K_c$  一般为 40%~60%<sup>[26]</sup>, 故选取表 6 中第 4 轴系自然扭振模态频率 32.28 Hz 作为研究对象, 对应的  $X_C$  为 30.56  $\Omega$ 。

当线路分别采用 Bergeron 模型、 $\pi$  模型、JMarti 模型时, 系统的电气谐振频率  $f_E$  难以使用简单公式进行计算, 故可利用 ATP 的扫频法计算电气谐振频

率。扫频法基本思路为: 将系统同步电机端等效为一可变频率单位正弦电压源, 系统某一频率下的稳态电流值即为系统在该频率下的导纳, 导纳最大值对应频率即为整个系统的电气谐振频率。四种线路模型的频率扫描结果如图 4 所示。在线路参数及系统串补度相同的前提下, 采用不同线路模型时系统电气谐振频率均为 27.72 Hz, 同表 6 中理论值一致。

表 6 谐振频率及相应串补参数理论计算结果

Table 6 Theoretical calculation results of resonant frequency and corresponding series compensation parameters

模态序号	1	2	3	4	5
轴系自然扭振模态频率 $f/\text{Hz}$	15.71	20.21	25.55	32.28	47.45
电气谐振频率 $f_E/\text{Hz}$	44.29	39.79	34.45	27.72	12.55
对应容抗值 $X_C/\Omega$	78.02	63.01	47.20	30.56	6.27
对应串补度 $K_c/\%$	118.02	95.31	71.40	46.23	9.48

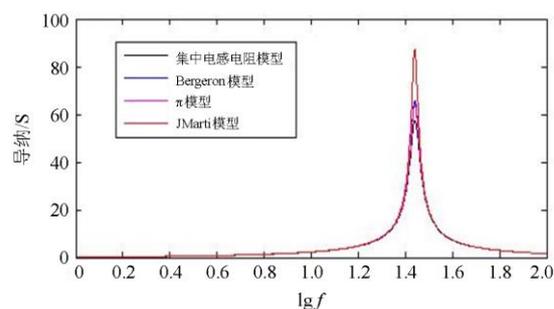


图 4 不同线路模型扫频对比结果

Fig. 4 Frequency scanning comparison results of different line models

由于各组验证模型串补度均相同, 故仅考虑线路电阻参数对系统阻尼水平的影响, 结合各线路模型特征, 可初步得到如下分析结论。

(1) 集中电感电阻模型实质为忽略对地容抗的  $\pi$  模型, 二者的电阻参数本质上相同, 故集中电感电阻模型与  $\pi$  模型对系统阻尼水平的影响相近。

(2) Bergeron 模型为恒定分布参数模型, 在建模过程中考虑波过程, 线路由波阻抗与波的传播时间来描述, 线路电阻被视为集中参数元件分段串联接入模型中。从结构上来看, Bergeron 模型与集中参数线路模型的电阻参数相同, 故其对系统阻尼水平的影响与集中参数线路模型接近。

(3) JMarti 模型为频率相关分布参数模型, 为目前最稳定、最精确的分布参数模型, 其同样考虑导线上波的传播过程, 不同于前三种恒定参数模型,

其参数会随频率变化，故不便于进行定量分析。该模型对系统阻尼水平的影响仅可直接通过仿真验证。

### 4 不同线路模型仿真分析验证

在大多数实际事故中，次同步振荡主要发生在低压缸与发电机之间的轴系<sup>[27]</sup>。设在串联补偿电容右侧发生三相短路故障，故障发生时刻为 0.2 s，持续 0.075 s 后消失。用 ATP-EMTP 仿真得低压缸 B 与发电机之间的轴系上的机械转矩变化情况如图 5 所示。由图 5 可知，机械转矩在故障切除后随时间逐渐增大，发生了机电耦合振荡。

仿真对比结果显示，使用不同线路模型均发生机电耦合振荡，机械转矩变化规律与图 5 一致，但数值不同，在第 10 s 时机械转矩数值统计结果见表 7。

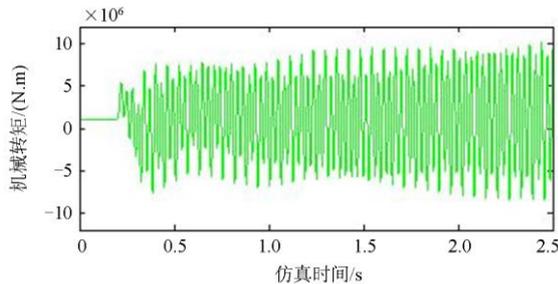


图 5 轴系机械转矩变化

Fig. 5 Mechanical torque change of shafting

表 7 机械转矩数值统计结果

Table 7 Numerical statistics results of mechanical torque

线路模型	$t = 10\text{ s}$ 时转矩/(N·m)
集中电感电阻模型	$38.73 \times 10^6$
Bergeron 模型	$39.35 \times 10^6$
$\pi$ 模型	$39.06 \times 10^6$
JMarti 模型	$30.98 \times 10^6$

由表 7 统计结果可看出：集中电感电阻模型、Bergeron 模型、 $\pi$  模型对应的轴系机械转矩数值较为接近，证明了这三种恒定参数线路模型所提供的阻尼水平相当。JMarti 模型对应的轴系机械转矩数值最小，证明了该模型所提供的阻尼水平最大，对轴系振荡具有一定抑制效果。

### 5 结论

本文通过对比不同线路模型对仿真分析串补次同步振荡现象的影响，可得到以下结论：

(1) 集中电感电阻模型、Bergeron 模型、 $\pi$  模型三种模型所提供的阻尼水平相当，集中电感电阻模型虽然作为粗略线路模型，但对分析串补次同步振荡现象的效果接近其他更为精确的恒定参数线路模型。故在一般分析中，线路模型可直接使用集中电

感电阻模型，以简化分析过程，快速得出结论。

(2) JMarti 模型在相同的线路参数下阻尼水平最大，对轴系振荡的发散程度具有一定抑制效果。在仿真分析时，若涉及次同步振荡抑制装置设计，为保证抑制效果，系统建模一般应在尽量减小阻尼水平的前提下进行。故在该类情形下，JMarti 模型的选用会受到一定限制，应谨慎使用。

### 参考文献

- [1] 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): 1-7. WEN Jinyu, SUN Haishun, CHENG Shijie. Subsynchronous oscillation in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 1-7.
- [2] WALKER D N, BOWLER C E J, JACKSON R L, et al. Results of subsynchronous resonance test at Mohave[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(5): 1878-1889.
- [3] NETO O M, MACDONALD D C. Analysis of subsynchronous resonance in a multi-machine power system using series compensation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2006, 28(8): 565-569.
- [4] IEEE SSR Working Group. First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.
- [5] IEEE SSR working Group. Second benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(5): 1057-1066.
- [6] GROUP I T I W. A bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(1): 216-218.
- [7] Terms, definitions and symbols for subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(6): 1326-1334.
- [8] Reader's guide to subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1992, 111(1): 150-157.
- [9] IEEE Committee Reports. First supplement to a bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 1872-1875.
- [10] IEEE Committee Reports. Second supplement to a bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems[J]. IEEE

- Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(2): 321-327.
- [11] IEEE Committee Reports. Third supplement to a bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1991, 110(2): 830-834.
- [12] IRAVANI M, AGRAWAL B, BAKER D, et al. Fourth supplement to a bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1997, 116(3): 1276-1282.
- [13] 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.
- [14] 王胜利, 许刚. 特高压近区风电汇集地区次同步振荡特征及防控措施[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 28-34.
- WANG Shengli, XU Gang. Subsynchronous oscillation features and control measures for wind power influx area near HVDC[J]. Electric Power, 2020, 50(3): 28-34.
- [15] 张航, 腾予非, 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 subsynchronous oscillation of power system with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 25-34.
- [16] 卓毅鑫, 李凌, 赵成斌, 等. 一种基于振荡发散速率的次同步振荡风电场精准切机策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 164-172.
- ZHUO Yixin, LI Ling, ZHAO Chengbin, et al. A precision wind farm tripping strategy under sub-synchronous oscillation situation based on oscillation divergence rate[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 164-172.
- [17] 赵鹏程, 王剑钊. 双馈风力发电机组轴系扭振特性研究[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 35-40.
- ZHAO Pengcheng, WANG Jianzhao. Torsional vibration characteristics of double-feed wind turbine shafting[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 35-40.
- [18] 张玉皓, 杨昆, 顾煜炯, 等. 汽轮发电机组参数对电力系统阻尼的影响[J]. 热力发电, 2019, 48(8): 1-7.
- ZHANG Yuhao, YANG Kun, GU Yujiong, et al. Influence of turbine generator set parameters on system damping[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(8): 1-7.
- [19] GUCHHAIT P K, BANERJEE A. Stability enhancement of wind energy integrated hybrid system with the help of static synchronous compensator and symbiosis organisms search algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power System, 2020, 5(2): 138-150. DOI: 10.1186/s41601-020-00158-8.
- [20] 陈浩, 徐军锋. 600 MW 超临界机组配汽特性对轴系振动的影响[J]. 华电技术, 2019, 41(9): 29-32.
- CHEN Hao, XU Junfeng. Influence of 600 MW supercritical unit steam distribution characteristics[J]. Huadian Technology, 2019, 41(9): 29-32.
- [21] Rule book: alternative transient program[M]. Canadian/American EMTP User Group, 1995.
- [22] 李云阁, 刘健, 曾垂杨. 输电线路电磁暂态仿真及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [23] 陈武晖, 黄杰, 陈金猛, 等. 电阻参数对次同步模态阻尼影响机制[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 159-164.
- CHEN Wuhui, HUANG Jie, CHEN Jinmeng, et al. Influencing mechanism of resistance parameter on subsynchronous model damping[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 159-164.
- [24] 杨帆, 王西田, 陈陈. 串联补偿输电系统次同步谐振的电气模态阻尼的参数敏感性分析[J]. 华东电力, 2005, 33(6): 22-27.
- YANG Fan, WANG Xitian, CHEN Chen. Analysis of parametric sensitivity of electrical mode dampings for subsynchronous resonance in series compensated transmission system[J]. East China Electric Power, 2005, 33(6): 22-27.
- [25] 李云阁. ATP-EMTP 及其在电力系统中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [26] ANDERSON P M, FARMER R G. 电力系统串联补偿[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [27] 鹿建成. 电力系统次同步振荡控制策略研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- LU Jiancheng. Research on control strategy of power system subsynchronous oscillation[D]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- 
- 收稿日期: 2020-12-30; 修回日期: 2021-02-25  
作者简介:  
郭劲东(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电磁暂态仿真与建模; E-mail: 3198528880@qq.com  
李云阁(1967—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统电磁暂态模拟和仿真实验。E-mail: yunge\_li@163.com
- (编辑 张爱琴)