

压水堆核电厂对电网低频振荡的影响

云雷¹, 刘涤尘¹, 赵洁¹, 黄涌²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072; 2. 华中电网有限公司, 湖北省 武汉市 430077)

Effects of Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant on Low-frequency-oscillation of Power Grid

YUN Lei¹, LIU Dichen¹, ZHAO Jie¹, HUANG Yong²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;

2. Central China Power Grid Co., Ltd., Wuhan 430077, Hubei Province, China)

ABSTRACT: With respect to the operation characteristics of pressurized water reactor (PWR) nuclear power plants, the impact on power system low frequency oscillation when large PWR nuclear power plants integrated in the grid was studied, which had an important significance for the steady operation of the nuclear power plants as well as the power system and effective control application in real time. Eigenvalue analysis method was used to search the oscillation modes related to Dafan nuclear power plant in Hubei power grid in 2015. Then matrix pencil analysis was utilized to make mode identification and curve fitting of the power oscillation to identify the dominant oscillation mode after disturbance in the grid. At last, power system stabilizer (PSS) was installed on Dafan nuclear power plant strongly correlated to the dominant mode to enhance system damping, so as to achieve the purpose of improve system stability. Simulation results show that the disturbance can stimulate some weak damping oscillation modes in the grid which may lead to large amplitude power oscillation occurred in Dafan nuclear power plant and its neighboring areas, and the rational allocation of PSS can effectively suppress low frequency oscillation to ensure safe and stable operation of the system.

KEY WORDS: power systems; pressurized water reactor (PWR) nuclear power plants; low frequency oscillation; matrix pencil analysis; power system stabilizer (PSS)

摘要: 针对压水堆核电厂的运行特性, 研究核电厂接入电网

基金项目: 国家自然科学基金项目(51077103); 中央高校基本科研业务费专项基金(武汉大学 20102070101000075)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51077103); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (20102070101000075 of Wuhan University).

后对电网低频振荡的影响, 这对于核电厂及电力系统的稳定运行与及时实施有效地控制具有重要的意义。利用特征值分析法搜索 2015 年湖北电网中与大畈核电相关的振荡模式, 并通过矩阵束分析法对扰动后的电网功率振荡曲线进行模态分析与曲线拟合来识别电网发生扰动后的主导振荡模式, 最后在该模式强相关的大畈核电机组上配置电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)来达到提高系统阻尼从而提高系统稳定性的目的。仿真结果表明, 扰动后会激发电网中若干弱阻尼振荡模式从而引起大畈核电及其邻近地区发生较大幅度的功率振荡, 而 PSS 的合理配置可以有效地抑制低频振荡从而保证系统的安全稳定运行。

关键词: 电力系统; 压水堆核电厂; 低频振荡; 矩阵束算法; 电力系统稳定器

0 引言

按照“十二五”能源规划目标, 中国将改变以煤炭为主的单一能源结构, 期间将大力推进核电建设。清洁高效是核能发电的优势, 作为可再生能源的典型代表, 核电具有不可限量的潜力, 也将成为中国能源转换格局的重要组成部分。核电厂具有单机容量大、核安全要求高、功率调节受限和需要停堆换料时间等特点, 因此核电厂运行特性的研究对电网的安全稳定运行具有至关重要的意义。国内外对核电站接入电网进行了相关的研究: 文献[1]在 PSASP 环境下对压水堆核电厂接入电力系统进行了建模和仿真; 文献[2]对北美核电机组的响应特性进行了研究; 文献[3]分析了大亚湾核电站接入系统后机网间的相互影响; 文献[4]利用 PSS/E 对田湾压水堆核电机组进行建模, 并仿真分析了对江苏电网系统扰动的响应; 文献[5]对核电站与抽水蓄能电站

的建模及联合运行进行了研究。目前国内学者对核电的研究大部分关注于核电机组的建模和本身的响应特性，为核电技术的发展打下了较好的基础。

现阶段中国的核电建设发展迅速，因此对核电接入电网的动态特性的研究也应同步进行，随着核电装机容量以及电网规模的逐渐扩大，核电厂将成为电网稳定性研究中不可忽视的一部分。一旦电网中低频振荡模式被激发，核电厂发电功率将发生大幅度波动，严重时会导致反应堆甩负荷甚至停堆，而核电厂停堆换料及恢复正常运行时间较长，往往造成整个电网的电源缺失，因此需要配置有效的功率控制装置保证核电机组的稳定运行。2015 年湖北省将规划建设中国内陆首座核电厂——湖北大畈核电厂，本文针对大畈核电机组接入电网后出现的低频振荡问题进行研究，通过特征值分析搜索与大畈核电相关的振荡模式，运用改进矩阵束算法对扰动后的大畈核电机组输出功率曲线进行模态分析和曲线拟合，并通过配置电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)^[6-8]达到有效地抑制电网低频振荡的目的。

1 利用 PSS 抑制大畈核电接入电网后低频振荡的方案

电网中一般有 2 种低频振荡^[9-11]：一类为区域间振荡模式，它是系统中一部分机群相对于另一部分机群的振荡，其频率范围为 0.2~0.7 Hz，这种振荡的危害性较大，一经发生会通过联络线向全系统传播；另一类为区域内振荡模式，它是电气距离很近的几个发电机与系统内其余发电机之间的振荡，其频率范围为 0.7~2.5 Hz，这种振荡局限于区域内，比前者影响范围小。大畈核电接入湖北电网后，由于压水堆核电厂开机容量大及压水堆反应特性等原因，会使电网静态运行点发生改变，对应线性化后的系统状态矩阵将会出现大畈核电参与的振荡模式，其中包括区域间振荡模式和区域内振荡模式，区域间振荡模式对电网影响较大，一经发生会通过联络线向全系统传播。本文将以对电网影响较大的区域间振荡模式为主要研究对象，利用特征值分析法搜索全网的低频振荡模式和阻尼比，并可以找到与之强相关的发电机组。

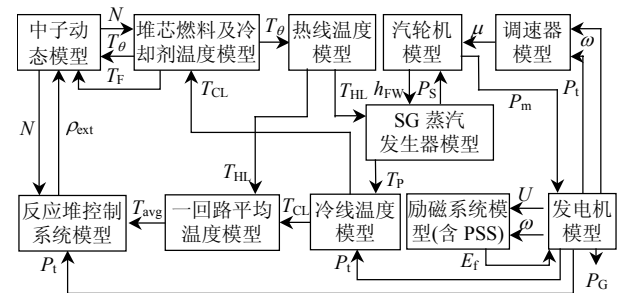
先采用特征值分析法^[12-14]对全网进行小干扰稳定分析，搜索出衰减阻尼比较小的低频振荡模式

进行模态分析，进一步筛选出与大畈核电强相关的振荡模式，通过在大畈核电机组及参与因子较高的发电机上安装 PSS 来提高系统的阻尼。运用矩阵束分析法对装设 PSS 后的大畈核电功率振荡曲线进行模式识别和曲线拟合，识别电网对应振荡模式的衰减阻尼比和频率情况。具体过程为先在大畈核电厂附近某 500kV 线路施加一扰动，并监测核电厂的有功出力，用矩阵束分析法拟合功率振荡曲线，根据特征值分析结果找到主导振荡模式，分析对比大畈核电加装 PSS 前后的核电机组的功率振荡情况。

2 压水堆核电厂接入电力系统的建模

为研究核电站接入电网后与电网的相互影响，须建立详细的核电机组数学模型^[15-17]。大畈核电是大型压水堆核电站，本文基于 PSASP 环境对核电站压水堆(pressurized water reactor, PWR)进行建模，整体模型如图 1 所示。

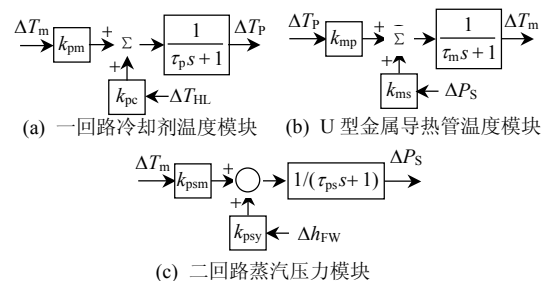
图 1 中，蒸汽发生器(如图 2 所示)、发电机(包



P_G 为核电机组输出有功功率； P_m 为汽轮机输出机械功率； P_i 为负荷功率； U 为机端电压； ω 为汽轮机转速； E_f 为励磁电压； P_s 为主蒸汽压力； N 为中子通量密度； T_0 为堆芯冷却剂温度； T_{HL} 为热段温度； T_{CL} 为冷段温度； T_F 为堆芯燃料温度； ρ_{ext} 为控制棒动作反应系数； T_P 为蒸汽发生器一次冷却剂温度； μ 为汽轮机主门开度； T_{avg} 为一回路平均温度测量值； h_{FW} 为输入汽轮机高压缸的蒸汽焓值。

图 1 大畈压水堆核电站整体模型图

Fig. 1 System of Dafan PWR model



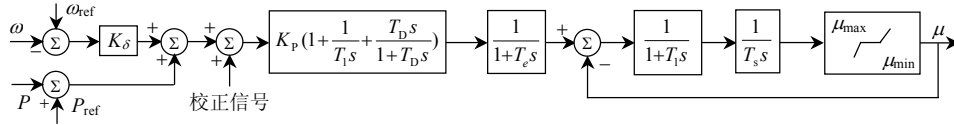
ΔT_m 为 U 型金属导热管的温度变化量； ΔT_p 为蒸汽发生器一次冷却剂温度； ΔT_{HL} 为热段温度； τ_p 为蒸汽发生器中冷却剂时间常数； ΔP_s 为蒸汽发生器压力； τ_m 为 U 型管时间常数； k_{pm} 、 k_{pc} 、 k_{mp} 、 k_{ms} 为模型计算系数； Δh_{FW} 为输入汽轮机高压缸的蒸汽焓值； τ_{ps} 为蒸汽压力时间常数； k_{psm} 为对应金属管温度； k_{psy} 为阀门开度的比例系数。

图 2 蒸汽发生器模型图

Fig. 2 Steam generation model

括调速器(如图 3 所示)和汽轮机(如图 4 所示))是核电厂的主要功率输送通道,当发电机端发生大幅度

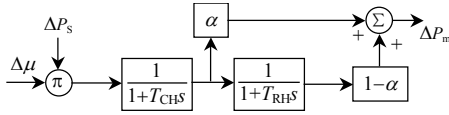
的功率波动时,将通过蒸汽发生器反馈至反应堆,影响反应堆的正常运行。



K_δ 为测速环节放大倍数; K_p 为PID环节比例系数; T_e 为电液转换器时间常数; T_1 为继电器时间常数; T_s 为油动机时间常数; T_D 为比例微分时间常数。

图 3 汽轮机调速系统模型图

Fig. 3 Steam governor model

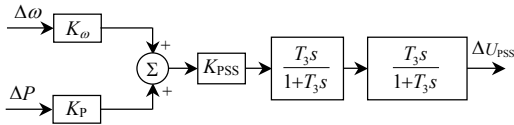


T_{CH} 为高压蒸汽容积时间常数; T_{RH} 为中间再热蒸汽容积时间常数;
 α 为高压缸稳态输出功率占汽轮机总输出功率的百分比。

图 4 汽轮机系统模型图

Fig. 4 Steam turbine model

设大亚核电发电机组采用 3 阶实用模型,励磁系统采用 3 阶模型,并考虑装设 PSS(PSS 传递函数图如图 5 所示),图 5 中 PSS 以发电机转速 $\Delta\omega$ 或电磁功率 ΔP 为输入信号,同时 PSS 输出 ΔU_{PSS} 作为励磁系统的附加控制信号。



K_ω 为速度偏差放大系数; K_p 为功率偏差放大系数; K_{PSS} 为放大环节系数; T_1 、 T_2 为相位补偿环节时间常数; T_3 为复位环节时间常数;
 U_{PSS} 为 PSS 输出电压。

图 5 PSS 传递函数图

Fig. 5 Diagram of PSS model

核电机组简化后的全系统线性化数学模型为

$$\begin{cases} D\Delta\delta = \Delta\omega \\ MD\Delta\omega = \Delta P_m - \Delta P_e - D\Delta\omega \\ T'_{d0} D\Delta E'_q = \Delta E_f - \Delta E_q \\ \Delta E_f = G_E(s)(-\Delta U_t + \Delta U_{PSS}) \\ \Delta U_{PSS} = G_{PSS}(s)(K_p \Delta P_e + K_\omega \Delta\omega) \\ \tau_p D\Delta T_p = k_{pm} \Delta T_m + k_{pc} \Delta T_{HL} - \Delta T_p \\ \tau_m D\Delta T_m = k_{mp} \Delta T_p + k_{ms} \Delta P_s - \Delta T_m \\ \tau_{ps} D\Delta P_s = k_{psm} \Delta T_m + k_{psy} \Delta h_{FW} - \Delta P_s \\ \Delta\mu = G_\mu(s)(k_\delta \Delta\omega + \Delta P_s) \\ \Delta P_m = G_{pm}(s)(\Delta\mu P_s + \Delta P_s \mu) \end{cases} \quad (1)$$

式中: D 为微分算子; $G_E(s)$ 为励磁系统传递函数; $G_{PSS}(s)$ 为 PSS 输出传递函数; $G_\mu(s)$ 为阀门开度传递函数; $G_{pm}(s)$ 为输出机械功率传递函数; ΔP_e 为电磁

功率; $\Delta E'_q$ 为暂态电动势; ΔE_q 为空载电动势; ΔE_f 为励磁电压; M 为惯性时间常数; T'_{d0} 为暂态时间常数。

3 矩阵束模态分析方法

矩阵束方法^[18-21]是 Hua 和 Sarkar 在 20 世纪 80、90 年代提出的一种参数估计方法,它可以用于从系统的扰动响应中直接提取振荡模式的频率、阻尼和幅值信息。其基本思想是构造特殊的矩阵(Hankel 矩阵),利用矩阵间的特殊关系,通过求解广义特征值来实现参数估计。

由采样序列 $y(k)(k=1,2,3,\dots,N)$ 构造 Hankel 矩阵:

$$Y = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(L+1) \\ y(2) & y(3) & \cdots & y(L+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-L) & y(N-L+1) & \cdots & y(N) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 L 为矩阵束参数,恰当地选择 L 可以抑制噪声干扰,通常在 $N/4 \sim N/3$ 之间取值。

对矩阵 Y 进行奇异值分解

$$Y = UDV^T \quad (3)$$

式中: U 为 $(N-L) \times (N-L)$ 正交矩阵; V 为 $(L+1) \times (L+1)$ 正交矩阵; D 为 $(N-L) \times (L+1)$ 对角阵,其元素 σ_i 为 Y 的奇异值。当观测信号不含噪声时, σ_i 中非零奇异值的个数即是求解的最大模态数 m 。当得到了最大模态数后,可以由 D 的前 m 个奇异值组成新矩阵:

$$D' = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_m \\ \mathbf{0}_{(L+1-m) \times m} \end{bmatrix} \quad (4)$$

再由 D' 构造 2 个 $(N-L) \times L$ 矩阵:

$$\begin{cases} Y_1 = UD'V_1^T \\ Y_2 = UD'V_2^T \end{cases} \quad (5)$$

式中： V_1 为由矩阵 Y 奇异分解后所得 V 阵的前 m 个主导右奇异向量组成的矩阵 V' 的第 1 行到第 L 行； V_2 为矩阵 V' 的第 2 行到第 $L+1$ 行。

通过求解矩阵 $G=Y_2-\lambda Y_1$ 的广义特征值 $\lambda_i(i=1, 2, 3, \dots, m)$ ，由 λ_i 通过式(6)—(8)可得对应模式的阻尼 ξ_i 和振荡角频率 ω_i ：

$$-\xi_i \omega_{ni} \pm j \omega_{ni} \sqrt{1 - \xi_i^2} = \frac{\ln \lambda_i}{T_s} \quad (6)$$

$$\xi_i = \{1 + [\text{Im}(\frac{\ln \lambda_i}{T_s}) / \text{Re}(\frac{\ln \lambda_i}{T_s})]^2\}^{-1/2} \quad (7)$$

$$f_i = \text{Re}(\frac{\ln \lambda_i}{T_s}) / (2\pi) \quad (8)$$

振幅 $R_i(i=1, 2, 3, \dots, m)$ 可以由以下最小二乘问题求解：

$$\begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & \cdots & z_m \\ z_1^2 & z_2^2 & \cdots & z_m^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^N & z_2^N & \cdots & z_m^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 $z_i(i=1, 2, 3, \dots, m)$ 为矩阵 G 的所有极点， m 为估计最大模态数。

4 大畈核电接入湖北电网的仿真计算

4.1 大畈核电接入湖北电网的运行方式

2015 年大畈核电厂计划装机容量 $4 \times 1250 \text{ MW}$ ，以 500 kV 电压等级接入湖北电网，主要向黄石、咸宁、武汉江南地区等地供电，大畈核电厂规划接入电网方式如图 6 所示。2015 年丰大方式下大畈核电厂计划投运 2 台 1250 MW 机组，湖北电网总有功出力为 49019 MW ，有功负荷为 32707 MW ，大畈向凤凰山传输有功功率 920 MW ，大畈向梁公铺传输有功功率 1580 MW 。

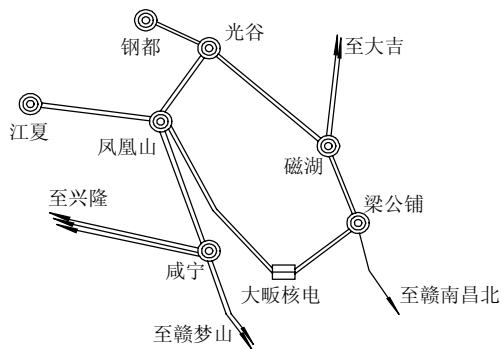


图 6 大畈核电接入电网规划方式图

Fig. 6 Planning grid structure when Dafan nuclear power plant integrates in the power system

4.2 大畈核电对电网低频振荡的影响

对 2015 年湖北省丰大方式进行小干扰稳定计算，可以搜索到包括华中电网在内的频率为 $0.2 \sim 2.5 \text{ Hz}$ 的机电振荡模式，共有 64 个，对这些振荡模式进行模态分析，可以找到与鄂大畈核电机组强相关的 5 个振荡模式，如表 1 所示。

表 1 系统机电振荡模式

Tab. 1 Electromechanical oscillation modes of system

| 序号 | 特征根实部 | 特征根虚部 | f/Hz | $\eta/\%$ |
|----|------------|-----------|---------------|-----------|
| 1 | -0.297 714 | 3.322 255 | 0.528 753 | 8.925 4 |
| 2 | -0.293 515 | 5.253 712 | 0.836 154 | 5.578 1 |
| 3 | -0.370 525 | 6.622 782 | 1.054 049 | 5.586 0 |
| 4 | -0.381 184 | 8.013 030 | 1.275 313 | 4.751 7 |
| 5 | -0.462 070 | 9.677 650 | 1.540 246 | 4.769 2 |

表 1 所列出的振荡模式阻尼比较低，属于弱阻尼振荡模式，当电网发生较大的扰动时，相应振荡模式的强相关机组包括鄂大畈 2 台核电机组的发电出力 and 相对功角将可能产生较严重的振荡，对电网构成威胁，影响电力系统稳定运行。

以鄂大畈核电厂附近某 500 kV 超高压输电线路为例，在该线路设置三相短路扰动，持续时间为 0.1 s ，监测鄂大畈 1 号机组的有功出力和与大畈核电厂直接联系的 2 条 500 kV 线路，监测结果如图 7—9 所示，对大畈核电有功出力曲线进行矩阵束法模式识别，曲线拟合过程如图 7 中虚线所示，

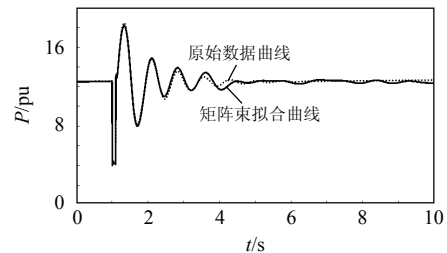


图 7 大畈核电发电功率及矩阵束拟合曲线

Fig. 7 Output power of Dafan nuclear power plant and curve fitting with matrix pencil method

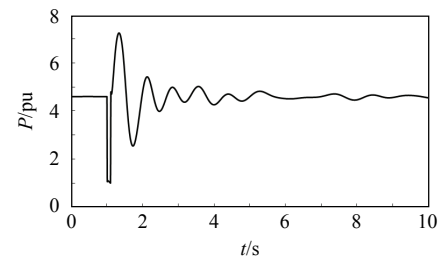


图 8 大畈—凤凰山传输功率曲线

Fig. 8 Transmission power from Dafan to Fenghuangshan

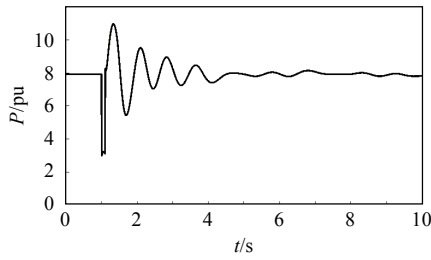


图9 大畈—梁公铺传输功率曲线

Fig. 9 Transmission power from Dafan to Lianggongpu
拟合结果如表2所示。

表2 矩阵束曲线拟合结果

Tab. 2 Curve fitting results with matrix pencil method

| 序号 | 幅值/pu | f/Hz | $\eta/\%$ |
|----|----------|---------------|-----------|
| 1 | 1.060 00 | 0.412 38 | 3.396 7 |
| 2 | 1.508 10 | 0.878 77 | 4.561 6 |
| 3 | 1.128 80 | 1.297 10 | 12.567 0 |
| 4 | 0.984 56 | 1.380 70 | 33.280 0 |
| 5 | 2.115 50 | 2.272 20 | 26.744 0 |

由图7—9可知,扰动发生后大畈1号核电机组输出功率曲线及邻近地区发生较大幅度的功率振荡,持续时间大概为5s,振荡总幅值超过1000MW。对应的模式识别如表2所示,模式2成为该曲线的主导振荡模式,其衰减阻尼比已经低于5%,难以满足运行要求,需采取有效措施对其进行抑制。

4.3 通过配置PSS抑制大畈核电功率振荡

PSS作为发电机励磁的附加控制单元,能增加系统的阻尼,而不会降低原有励磁系统电压环的增益及调压性能,也不会影响励磁系统的暂态特性。现对大畈2台核电机组和该模式强相关的机组配置PSS,并对湖北电网2015年丰大方式进行小干扰稳定计算,与大畈核电强相关的振荡模式如表3所示。

对比表3和表1,可以发现,在大畈等发电机组上配置PSS后,系统中对应振荡模式的衰减阻尼比均有所提高。装设PSS有效地提高了系统的阻

表3 系统机电振荡模式

Tab. 3 Electromechanical oscillation modes of system

| 序号 | 特征根实部 | 特征根虚部 | f/Hz | $\eta/\%$ |
|----|------------|-----------|---------------|-----------|
| 1 | -0.329 586 | 3.290 943 | 0.523 770 | 9.965 10 |
| 2 | -0.787 645 | 5.212 269 | 0.829 558 | 14.941 70 |
| 3 | -0.768 179 | 6.685 287 | 1.063 996 | 11.415 50 |
| 4 | -0.629 205 | 8.223 627 | 1.308 831 | 7.628 90 |
| 5 | -0.730 408 | 9.858 234 | 1.568 987 | 7.388 90 |

尼,对保证电网的稳定运行起着关键作用。

再取湖北省大畈核电厂附近某500kV线路,设置三相短路扰动,持续时间为0.1s,监测大畈核电1号机组的发电功率和邻近500kV线路传输功率,结果如图10—12所示。

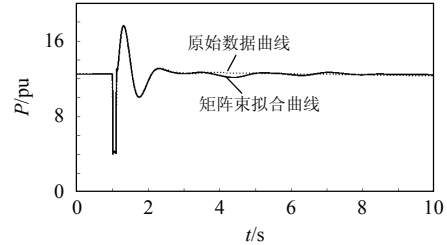


图10 大畈核电发电功率及矩阵束拟合曲线

Fig. 10 Output power of Dafan nuclear power plant and curve fitting with matrix pencil method

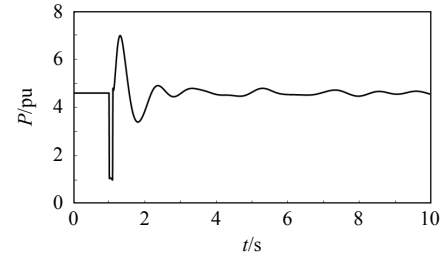


图11 大畈—凤凰山传输功率曲线

Fig. 11 Transmission power from Dafan to Fenghuangshan

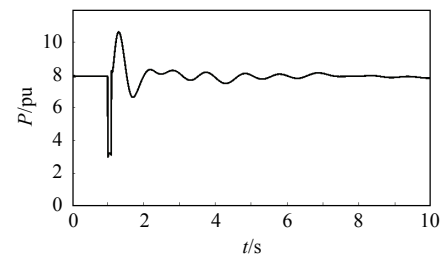


图12 大畈—梁公铺传输功率曲线

Fig. 12 Transmission power from Dafan to Lianggongpu

对比图6和图10,在核电机组配置PSS后,大畈核电机组输出功率曲线摆动次数明显较少,功率振荡在一个周期后就基本上趋于平稳,低频振荡得到了有效抑制。对其进行矩阵束分析,分析结果如表4所示。

对比表4和表2可见,配置PSS后原功率曲线的主导振荡模式阻尼比有大幅度提高,其他振荡模式阻尼也有显著增加,低频振荡得到有效抑制,电网的稳定性也相应增强。

表 4 矩阵束曲线拟合结果

Tab. 4 Curve fitting results with matrix pencil method

| 序号 | 幅值/pu | f/Hz | $\eta/\%$ |
|----|----------|----------|-----------|
| 1 | 1.119 80 | 0.437 54 | 12.249 |
| 2 | 0.130 77 | 0.810 27 | 31.156 |
| 3 | 1.551 10 | 1.249 00 | 33.671 |
| 4 | 0.105 66 | 1.765 00 | 39.992 |
| 5 | 1.417 60 | 2.440 00 | 31.511 |

5 结论

本文对大坂核电厂接入电网的模型进行建模，在 2015 年湖北电网丰水期大运行方式下进行小干扰稳定计算，搜索出与大坂核电厂相关的振荡模式，并用矩阵束算法对扰动后的大坂核电输出功率曲线进行模态分析，得出以下结论：

1) 大坂核电厂接入湖北电网后会出现与其强相关的振荡模式，且阻尼比相对较低；

2) 扰动后大坂核电厂及其附近地区会发生较大幅度的功率振荡，经矩阵束算法进行模态分析，确认扰动后会激发与核电厂强相关的振荡模式；

3) 通过识别功率振荡曲线中的主导模式，并结合小干扰稳定分析结果，在大坂核电厂等相关机组中装设 PSS，可以有效地抑制电网的低频振荡，达到提高系统阻尼从而保证电网稳定性的目的。

参考文献

- [1] 赵洁, 刘涤尘, 吴耀文. 压水堆核电厂接入电力系统建模[J]. 中国电机工程学报, 2009, 39(31): 8-13.
Zhao Jie, Liu Dichen, Wu Yaowen. Modelling of pressurized water reactor nuclear power plant integrated into power system simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 39(31): 8-13(in Chinese).
- [2] Maldonado G I. The performance of North American nuclear power plants during the electric power blackout of August14, 2003[C]//IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Rome, Italy: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004: 4603-4606.
- [3] 张学成, 胡学浩, 周修铭, 等. 具有核电模型的中期动态模拟程序开发及大型核电核电厂与电力系统相互影响的研究[J]. 电网技术, 1995, 19(2): 5-10.
Zhang Xuecheng, Hu Xuehao, Zhou Xiuming, et al. Development of midterm dynamic simulation program including nuclear power plant model and study of interaction between large nuclear power plant and power system[J]. Power System Technology, 1995, 19(2): 5-10(in Chinese).
- [4] 高慧敏, 孙蓉, 徐政. 田湾核电机组动态模型研究及其对江苏电网系统扰动的响应分析[J]. 华东电力, 2006, 34(5): 6-10.
Gao Huimin, Sun Rong, Xu Zheng. Dynamic models of Tianwan nuclear units and their response to system disturbances of jiangsu power grid[J]. East China Electric Power, 2006, 34(5): 6-10(in Chinese).
- [5] 高慧敏. 核电站与抽水蓄能电站的数学建模及联合运行[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Gao Huimin. Nuclear power plant and pumped storage station modeling and coordinated operation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006(in Chinese).
- [6] 芦晶晶, 郭剑, 田芳, 等. 基于 Prony 方法的电力系统低频振荡模式分析及 PSS 参数设计[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 31-34.
Lu Jingjing, Guo Jian, Tian Fang, et al. Power system oscillation mode analysis and parameter determination of PSS based on Prony method[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 31-34(in Chinese).
- [7] 赵书强, 常鲜戎, 贺仁睦, 等. PSS 控制过程中的借阻尼现象与负阻尼现象[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 7-11.
Zhao Shuqiang, Chang Xianrong, He Renmu, et al. Borrow damping phenomena and negative damping effect of PSS control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 7-11(in Chinese).
- [8] 牛振勇, 杜正春, 方万良, 等. 基于进化策略的多级系统 PSS 参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 22-27.
Niu Zhenyong, Du Zhengchun, Fang Wanliang, et al. Parameter optimization of multi-machine power stabilizers using evolutionary strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 22-27(in Chinese).
- [9] 朱方, 赵红光, 刘增煌, 等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1-7.
Zhu Fang, Zhao Hongguang, Liu Zenghuang, et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 1-7(in Chinese).
- [10] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 552-555.
Kundur P. Power system stability and control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 552-555(in Chinese).
- [11] 倪以信, 陈寿孙, 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: 260-266.

- Ni Yixin, Chen Shousun, Zhang Baolin. Theory and analysis of dynamic power system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 260-266(in Chinese).
- [12] 樊爱军, 雷宪章, 刘红超, 等. 研究大规模互联电网区域振荡的特征根分析方法[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 35-39.
- Fan Aijun, Lei Xianzhang, Liu Hongchao, et al. Eigenvalue analysis for inter-area oscillations in large-scale interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 35-39(in Chinese).
- [13] 徐东杰, 贺仁睦, 胡国强, 等. 正规形方法在互联电网低频振荡分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 18-23.
- Xu Dongjie, He Renmu, Hu Guoqiang, et al. Analysis of low frequency oscillations using normal form method [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 18-23(in Chinese).
- [14] 邓集祥, 华瑶, 韩雪飞. 大干扰稳定中低频振荡模式的作用研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 60-64.
- Deng Jixiang, Hua Yao, Han Xuefei. Study on effect of low frequency oscillation modes in large disturbance stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 60-64(in Chinese).
- [15] 施希, 刘涤尘, 吴萍, 等. 基于 PSASP 的压水堆核电站堆芯建模及仿真研究[J]. 核动力工程, 2009, 30(3): 126-130.
- Shi Xi, Liu Dichen, Wu Ping, et al. Simulation of dynamic mathematical modeling for PWR nuclear power plant core based on PSASP[J]. Nuclear Power Engineering, 2009, 30(3): 126-130(in Chinese).
- [16] 施希, 赵遵廉, 刘涤尘. 基于 PSASP 的核反应堆数学模型及其动态响应特性[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 55-59.
- Shi Xi, Zhao Zunlian, Liu Dichen. A mathematical model of nuclear power reactor and its dynamic response based on power system analysis software package[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 55-59(in Chinese).
- [17] 赵洁, 刘涤尘, 熊莉. 基于 PSASP 自定义模型的核电机组动态响应仿真[J]. 核动力工程, 2010, 31(3): 113-117.
- Zhao Jie, Liu Dichen, Xiong Li. Simulation of dynamic response of nuclear power plant based on user-defined model in PSASP[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(3): 113-117(in Chinese).
- [18] 王宇静, 于继来. 电力系统振荡模态的矩阵束辨识法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 12-17.
- Wang Yujing, Yu Jilai. Matrix pencil method of oscillation models identification in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 12-17(in Chinese).
- [19] Hua Yingbo, Sarkar T K. Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1990, 38(5): 814-824.
- [20] Hua Y, Sarkar T K. On SVD for estimating generalized eigenvalues of singular matrix pencil in noise[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1991, 39(4): 892-900.
- [21] 姜卫东, 庄钊文, 陈曾平. 基于矩阵束的二维谐波恢复[J]. 信号处理, 2000, 16(3): 235-239.
- Jiang Weidong, Zhuang Zhaowen, Chen Zengping. Two-dimensional harmonic retrieval by matrix pencil method [J]. Signal Processing, 2000, 16(3): 235-239(in Chinese).



云雷

收稿日期: 2011-07-26。

作者简介:

云雷(1984), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制, yunlei0232@gmail.com;

刘涤尘(1953), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行与控制、电力自动监控、电力电子技术应用方面的研究, dcliu@whu.edu.cn;

赵洁(1986), 男, 博士研究生, 主要研究方向为核电厂、电力系统运行与控制, xtzhaojie@163.com。

(责任编辑 刘浩芳)