

基于相关辨识法的大型光伏电站广域阻尼控制器设计

葛 景¹, 都洪基¹, 马 进², 赵大伟³, 钱敏慧³, 朱凌志³

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏南京 210094; 2. 悉尼大学电气与信息学院, 悉尼 NSW2006;
3. 中国电力科学研究院(南京), 江苏南京 210003)

Design of Wide-area Damping Controller for Large-scale PV Power Plants Based on Correlation Identification Method

GE Jing¹, DU Hongji¹, MA Jin², ZHAO Dawei³, QIAN Minhui³, ZHU Lingzhi³

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. School of Electrical and Information Engineering, University of Sydney, Sydney NSW2006, Australia;
3. China Electric Power Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, China)

摘 要: 针对含大型光伏电站的电力系统可能存在的区间低频振荡问题, 提出基于相关辨识法的大型光伏电站广域阻尼控制器设计方法。首先采用基于伪随机信号的相关辨识法得到系统的开环传递函数。接着将 TLS-ESPRIT 法应用到主模比指标的计算中, 并结合留数指标对阻尼控制器输入信号进行优选, 然后采用极点配置的方法整定控制器参数。最后, 在 DigSILENT/PowerFactory 中搭建含光伏电站的两区域系统机电暂态模型, 时域仿真结果表明: 所提出的光伏广域阻尼控制器能够有效抑制系统区间低频振荡, 提升了系统小干扰稳定性。

关键词: 光伏电站; 相关辨识法; 伪随机信号; 主模比指标; 广域阻尼控制器

Abstract: As to the potential inter-area low-frequency oscillation problem of power system with grid-connected large-scale photovoltaic (PV) power plants, wide-area damping controller (WADC) for large-scale PV power plants is proposed based on correlation identification method. Firstly, the open loop transfer function of the system is obtained by correlation identification method based on pseudo random signals. Then TLS-ESPRIT (total least squares- estimation of signal parameters via rotational invariance techniques, TLS-ESPRIT) method is applied in calculating dominant mode ratio (DMR) to select the optimal input signal of WADC by combining residue index. Secondly, the parameters of WADC are regulated by using pole placement method. Finally, the electromechanical transient model of two-area system with grid-connected PV power plants is built by DigSILENT/PowerFactory. The time-domain simulation re-

sults show that PV WADC for power system with grid-connected large-scale PV power plants can effectively control inter-area low-frequency oscillation, and improve the small signal stability of power system.

Keywords: photovoltaic (PV) power plants; correlation identification method; pseudo random signals; dominant mode ratio (DMR); wide-area damping controller (WADC)

0 引 言

近年来, 我国光伏发电产业步入快速发展阶段。据国家能源局统计: 截至 2015 年底, 我国光伏发电装机达 0.43 亿 kW, 超过德国成为世界上光伏累计装机容量最大的国家。然而, 大型光伏电站的出力具有间歇性、随机性的特点, 在光伏电站受到诸如云层遮挡、日食等环境因素的影响时, 电力系统的安全稳定运行将会遭遇极大挑战^[1-2]。此外, 由于我国能源资源与负荷呈逆向分布的特点, 大规模新能源发电通常需要远距离输送。光伏电站为零惯量单元, 大规模光伏并网会导致系统等效惯量的下降。已有研究表明, 大规模光伏并网后可能会对系统的区间低频振荡模式产生负面影响^[3]。因此, 在光伏发电快速发展的背景下, 亟需采取相应的附加控制方案以降低系统发生低频振荡的风险。

针对光伏参与抑制系统低频振荡问题, 国内外已取得了一些研究成果。文献 [4-5] 以单机无穷大系统为例, 研究了光伏电站有功调制、无功调制抑制低频振荡的能力。为了利用光伏的有功调制能力, 需要预留一定的调节裕度, 即降低光伏电站的

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(NY71-14-001)

有功功率运行点。文献 [6] 提出运行规划算法，充分利用可再生能源发电的无功调节能力，通过分析可再生能源无功控制对低频振荡模式的影响，选择不同的无功控制方案。文献 [7] 重点研究了基于广域测量信号的光伏阻尼控制器设计方法，结合多性能指标选取阻尼控制器的输入信号。文献 [8] 采用线性二次高斯控制设计光伏阻尼控制器，存在控制器阶数高、工程适用性较差的缺点。综上所述，全面考虑不同反馈信号的综合性能指标、设计满足工程应用要求的光伏广域阻尼控制器，具有重要意义。

准确获取系统的线性化模型是阻尼控制器设计的重要前提。随着电力技术不断革新，大量新产品、新设备的广泛使用增加了系统线性化建模的难度。通过向系统施加小扰动以激发系统的动态特性，采用系统辨识的方法获取等效的线性化模型将为控制器的设计带来便利^[9]。

本文采用相关辨识法获得系统线性化模型。通过在光伏无功控制点处施加伪随机信号以激发系统动态特性，基于相关辨识法得到系统开环传递函数。在此基础上，综合考虑待选反馈信号的控制性能指标，分两步对阻尼控制器的输入信号进行优选，即首先采用留数指标分别选出各类反馈信号组中对于区间模式可观性最强的信号，然后依据主模比指标从反馈信号中进一步选出控制代价最小者作为最终反馈信号，并提出将 TLS-ESPRIT 法应用到主模比指标的计算中以降低运算复杂度。最后基于极点配置法对阻尼控制器参数进行整定。以 DIgSILENT/PowerFactory 软件平台中搭建的含光伏电站的两区域系统为例，通过时域仿真验证了所设计控制器的有效性。

1 光伏电站建模

目前大型光伏电站多采用单级式并网逆变系统，其典型模型如图 1 所示，主要由光伏阵列、逆变器、控制系统等部分组成^[10]。

图 1 中， I_{PV} 为光伏阵列输出电流， U_{dc} 、 U_{dc-ref} 分别为直流侧电容电压、直流侧电容电压参考值， U 、 U_{ref} 分别为交流侧电压、交流侧电压参考值。控制系统输出有功、无功电流指令至逆变器，分别控制逆变器输出有功、无功功率。

对于光伏阵列，目前大都采用工程实用模

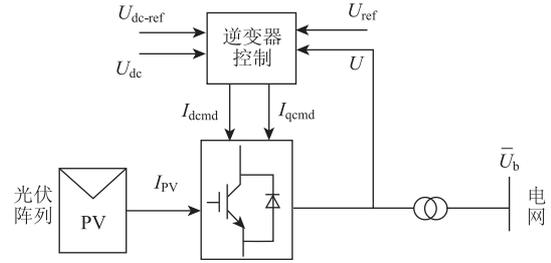


图 1 单级式光伏并网模型

型^[11]，其数学形式表现为代数方程。由图 1 可知，影响光伏并网动态特性的主要是逆变器及其控制系统。目前光伏并网逆变器及其控制系统通常采用基于电压源型换流器的双环控制系统，如图 2 所示^[3]。

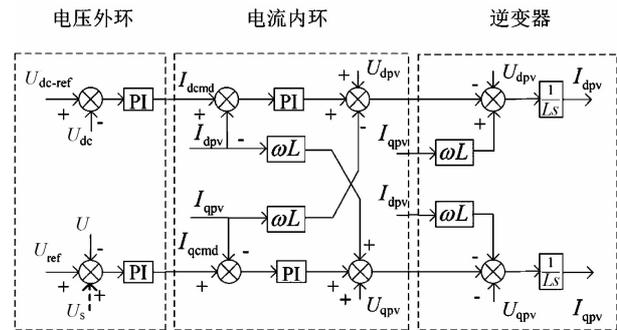


图 2 光伏逆变器及控制系统

由图 2 可知，光伏电站有功、无功实现解耦控制。通过控制交流侧电压可以独立控制光伏电站的输出无功电流参考值。

因此，通过无功控制环节叠加一个调制分量（如图 2 中 U_s 所示），可以调节系统发生振荡时光伏电站的无功出力，间接调整系统有功功率的分布以实现平抑区域联络线功率波动的目标。需要指出的是，无功调制并不需要减少光伏电站有功出力，在平抑振荡的同时也可充分利用光照资源。

2 相关分析法辨识

电力系统是典型的高维度非线性系统，其动态特性由下列微分代数方程组表示：

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = g(x, u) \end{cases} \quad (1)$$

式中： x 为状态向量； u 为输入向量； y 为输出向量，均为列向量。在研究小干扰稳定性时，需要对式(1)作线性化处理得到系统的状态方程组：

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{y} = \mathbf{C}\Delta \mathbf{x} \end{cases} \quad (2)$$

式中： \mathbf{A} 为状态矩阵； \mathbf{B} 为输入矩阵； \mathbf{C} 为输出矩阵。因此，输入输出间的传递函数表达式为

$$G(s) = \frac{\Delta \mathbf{y}(s)}{\Delta \mathbf{u}(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} \quad (3)$$

为了解析法在线性化建模中的困难，采用激励响应辨识系统传递函数的方法得到了更多关注，如基于 Prony 分析的传递函数辨识法^[12]。然而该方法抗噪声干扰能力较差，限制了其在实际系统中的应用。此外，该方法的输入信号通常为阶跃信号，无法完全激发系统的动态特性。

伪随机信号含有丰富的频率信息，可以充分激励系统的动态特性，且由于激励幅度较小，不会影响系统的正常运行。基于伪随机信号的相关分析法不仅可以在线辨识，还可以消除外界噪声的干扰，适合工程应用^[13]。因此本文采用基于伪随机信号的相关分析法辨识系统的传递函数。其主要步骤为：

① 向系统的控制输入点——光伏电站的无功电压参考值 U_{ref} 处注入伪随机信号；

② 利用 PMU 装置在反馈信号处监测输出响应，值得注意的是，这里的伪随机信号与输出响应均是离散时间序列 $X(t)$ 、 $Y(t)$ ；

③ 分别计算输入信号的自功率谱 $G_{XX}(\omega)$ 、输入输出信号的互功率谱 $G_{XY}(\omega)$ ；

④ 计算系统的开环传递函数频率序列：

$$G(\omega) = \frac{G_{XY}(\omega)}{G_{XX}(\omega)} \quad (4)$$

⑤ 由式(4)进一步地采用最小二乘估计法拟合出系统的开环传递函数：

$$G(s) = \frac{A(s)}{B(s)} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} \quad (5)$$

式中： R_i 为对应振荡模式 i 的留数， $\lambda_i = -\sigma \pm j\omega$ 为振荡模式 i 的特征值。

3 光伏广域阻尼控制器设计

3.1 广域阻尼控制器结构

通过传统控制理论所设计的高阶控制器在工程中难以实现。本文采用如图 3 所示的控制器结构，主要包括：量测环节、隔直环节、相位补偿环节、增益环节、限幅环节。

图中：量测环节传递函数为 $1/(1+sT_r)$ ， T_r

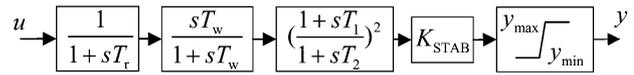


图 3 光伏广域阻尼控制器结构

为量测单元的时间常数；

隔直环节传递函数为 $sT_w/(1+sT_w)$ ，该环节保证阻尼控制器在系统稳态运行时无输出， T_w 的取值范围一般为 5~10s。

单个相位补偿环节传递函数为 $(1+sT_1)/(1+sT_2)$ ，该环节的作用是补偿相角，确保系统极点向复平面左半平面移动。单个超前-滞后环节的补偿角度一般不超过 60° 。

增益环节 K_{STAB} 决定了控制器提供的阻尼大小。

限幅环节用于限制光伏无功调制分量的大小，防止调节量超过逆变器容量限制。

3.2 反馈信号选择

令系统的输出反馈控制器传递函数为 $H(s)$ ，且开环系统的振荡模式 i 对应的留数为 R_i ，则附加反馈控制器后系统的原振荡模式 i 的特征值将会发生变化，令变化量为 $\Delta\lambda_i$ ，有^[14]：

$$\Delta\lambda_i \approx -R_i H(\lambda_i) \quad (6)$$

进一步得到： $|\Delta\lambda_i| \approx |R_i| |H(\lambda_i)|$ 。可知，对于给定振荡模式和附加控制器，留数 R_i 的幅值越大， $|\Delta\lambda_i|$ 越大。因此，当考虑控制器增益作为控制代价时， $|R_i|$ 可以作为反馈信号选择的指标。实际上， $|R_i|$ 为模式可控性与可观性的乘积，二者在反馈信号选择中的本质相同。然而留数指标与反馈信号的量纲有关，因而只适用于同类信号间的比较。广域信号包含大量不同种类的信息^[15]，单独使用留数法选择反馈信号已无法满足需求。在工程应用中需进一步考虑控制器输出能量的大小以考察控制器单位输出能量的阻尼效果。主模比指标衡量了在对主导振荡模式相同阻尼效果下控制器输出量 Δu 的最大幅值 $\max|\Delta u|$ 的大小，其数学表达式为^[16]

$$DMR = \frac{|\phi_i| |z_i(0)|}{\sum_{k=1}^n |\phi_k| |z_k(0)|} \quad (7)$$

式中各变量含义可参考文献 [16]。反馈信号的 DMR 值越大，则单位控制输出量的阻尼效果越好。对于多机系统，通过解析的方法得到不同反馈信号的主模比指标值较为复杂。值得注意的是， $|\phi_k| |z_k(0)|$ 为系统受扰后反馈信号时域响应中模式 k 的振荡幅值，其数值可通过振荡信号分解的方法得到。传统的

Prony 分析法计算精度容易受噪声影响，工程适用性差。TLS-ESPRIT 法^[17]通过将信号分解为信号子空间和噪声子空间，能够较好地消除噪声干扰对于信号分解精度的影响。因此本文利用 TLS-ESPRIT 法计算不同反馈信号的主模比指标值，该方法容易在大系统中实现。与留数法相比，主模比指标不受系统量纲的影响，因而适用于不同种类反馈信号间的进一步比较。

令 TLS-ESPRIT 法得到的振荡分量表达式为

$$y(n) = \sum_{p=1}^P A_p e^{j\theta_p} e^{(-\alpha_p + j2\pi f_p)nT_s} \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (8)$$

式中： A_p 、 θ_p 、 α_p 、 f_p 分别为第 p 个振荡模式的幅值、初相、衰减因子及频率， T_s 为采样周期， N 为采样点数。DMR 值可进一步表示为

$$DMR = \frac{A_i}{\sum_{p=1}^P A_p} \quad (9)$$

实际应用中，通常需要对系统施加不同扰动，分别求取不同扰动形式下的 DMR 并取其均值^[16]。

综上所述，本文所采用的反馈信号选择方法主要步骤如下：

① 根据量纲的不同将反馈信号分成 m 类，并分别计算不同反馈信号的留数，按照留数幅值大小对各类信号进行预选择，即分别选择各类反馈信号中留数幅值最大者作为预选择信号；

② 采用基于 TLS-ESPRIT 法的主模比指标对步骤①的预选择信号进一步优选，选出 DMR 指标最大者作为最终的反馈信号。

本文首先采用留数法分别选出各类反馈信号中可控/可观性最强的作为备选控制器输入；在此基础上进一步考虑控制器设计的代价，采用基于 TLS-ESPRIT 法的主模比指标最终选出控制性能最优的反馈信号。

3.3 控制器参数整定

在设计控制器时，通常希望原系统特征值在附加控制后虚部变化不大，以降低控制代价。这在复平面中表现为所关心振荡模式特征根平行向左侧移动，在控制系统中可以通过根轨迹法则进行设计。基于根轨迹法则的极点配置法通过配置控制器参数使得闭环系统的极点经过特定位置，改善系统的阻尼特性。对于如图 4 所示控制结构，闭环系统的传递函数为

$$G'(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (10)$$

式(10)中： $G'(s)$ 为闭环传递函数。将 $G'(s)$ 的极点配置为 λ' ，即 $1 + G(\lambda')H(\lambda') = 0$ 。因此：

$$H(\lambda') = -\frac{1}{G(\lambda')} \quad (11)$$

可以进一步得到控制器参数：

$$\begin{cases} |H(\lambda')| = \left| \frac{1}{G(\lambda')} \right| \\ \arg[H(\lambda')] = \pi - \arg[G(\lambda')] \end{cases} \quad (12)$$

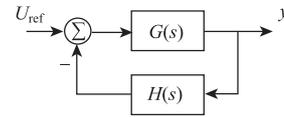


图 4 反馈控制结构图

超前-滞后环节参数可按系统所需补偿角度进行整定计算^[18]：

$$\begin{cases} \sin \theta = (1 - \alpha)/(1 + \alpha) \\ \alpha = T_2/T_1 \\ \omega = 1/\sqrt{\alpha}T_1 \end{cases} \quad (13)$$

式中： θ 为所需补偿的相位； ω 为所关心振荡模式频率。

3.4 光伏广域阻尼控制器设计

本文所采用的基于相关辨识法的光伏广域阻尼控制器设计步骤如下：

① 确定系统的待选反馈信号组。向光伏电站无功控制点 U_{ref} 处注入伪随机信号，并测量反馈信号离散响应时间序列，采用相关辨识法得到系统的开环传递函数；

② 按照本文提出的反馈信号选择方法选出性能最优者作为控制器的输入；

③ 基于输入-输出开环传递函数，按照极点配置法完成控制器参数整定；

④ 采用时域仿真比较附加控制器前后系统动态响应，校验控制器阻尼性能。

4 仿真实验

利用 DIgSILENT/PowerFactory 软件平台建立含光伏电站的两区域系统，如图 5 所示。其中，G1~G4 均为额定容量 900MVA 的同步电机，G2 为平衡机，同步电机及系统的详细参数见文献 [18]。同步电机励磁调节器采用 1 型 AVR 模型，调速器采用 1 型 GOV 模型。正常运行状态下，4 台同步电机均未配置 PSS。为了便于分析，光伏电站采用单机倍乘等值，有功出力为 200MW，正常

运行时采用单位功率因数运行方式，区域1向区域2输送功率400MW。

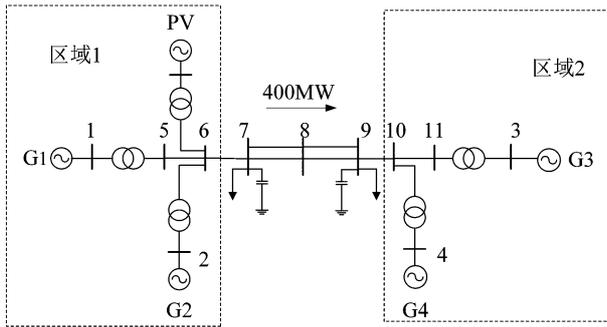


图5 含光伏电站的两区域系统

将待选反馈信号按量纲分为4类：同步电机转速差、同步电机功角差、联络线有功功率、联络线有功电流。通过向光伏系统无功电压参考值处注入伪随机信号，分别观测这4类响应输出量，通过相关分析法辨识得到系统开环传递函数。各类反馈信号中留数幅值最大的分别为： $[\Delta\omega_{13}、\Delta\delta_{13}、P_{78}、I_{p78}]$ ，即预选择的反馈信号为：同步电机G1、G3转速差、同步电机G1、G3功角差、联络线7-8有功功率、联络线7-8有功电流。进一步地，分别得到反馈信号的主模比指标值如表1所示。其中，同步机转速差 $\Delta\omega_{13}$ 主模比最大，联络线功率 P_{78} 次之。通常转速差信号需要分别测量两个不同区域同步机转速变量，需要的通信通道更多，且由于信道间时滞的不同会导致延时进一步增加^[19]。因而本文选取DMR值同样较大的 P_{78} 作为最终的反馈信号。

通过相关辨识法得到开环传递函数为

$$G(s) = \frac{0.36s^5 + 2.04s^4 + 5.02s^3 - 9.13s^2 - 6.67s - 161.8}{s^6 + 2.324s^5 + 28.94s^4 + 52.17s^3 + 222.3s^2 + 292.8s + 258.7} \quad (14)$$

将区间模式对应的极点配置为 $-0.64 + j3.1$ ，对应的阻尼比为20%。按照式(11)至式(13)整定控制器参数。得到的控制器为

$$H(s) = 1.17 \frac{10s}{1+10s} \times \frac{(1+0.42s)^2}{(1+0.25s)^2} \quad (15)$$

表1 不同种类反馈信号DMR值

反馈信号	$\Delta\omega_{13}$	$\Delta\delta_{13}$	P_{78}	I_{p78}
DMR	0.833	0.720	0.812	0.706

为了校验所设计阻尼控制器对于区间模式的抑制效果，采用时域仿真法比较故障情况下加入光伏阻尼控制器前后的系统响应。所设置的故障为：母

线8处在第1s时发生持续0.1s的三相金属性接地短路。选取对区间模式可观性较强的信号作为观测量：联络线7-8单回线传输功率、母线8电压、母线7、9电压相角差。接入阻尼控制器前后系统时域响应对比分别如图6~图8所示。

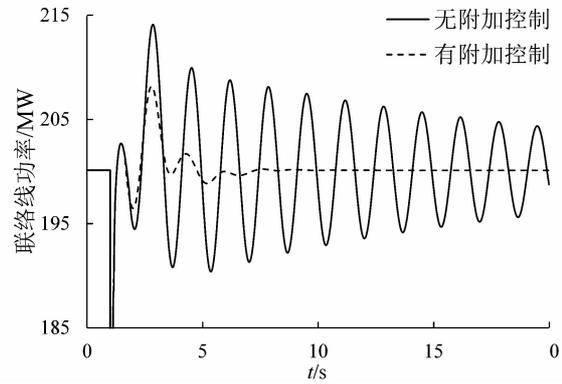


图6 联络线7-8功率响应曲线

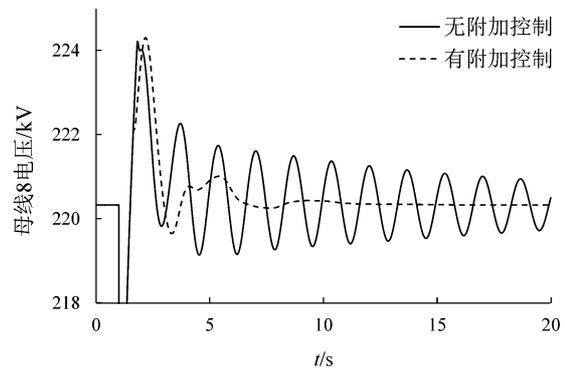


图7 母线8电压响应曲线

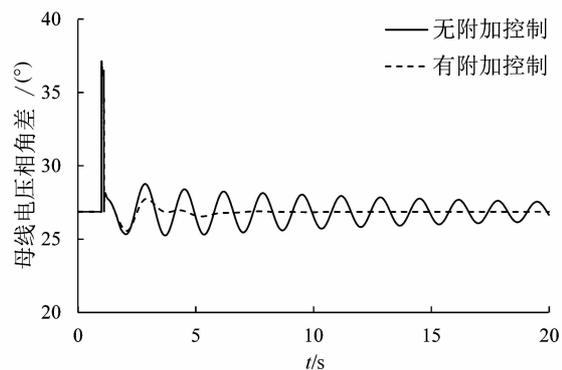


图8 母线7、9电压相角差响应曲线

可以看出，在无附加控制情况下，包括联络线功率、母线电压幅值、母线电压相角差在内的动态响应均出现了较大幅度的振荡，且衰减较为缓慢，在20s时仍未平息。而接入光伏广域阻尼控制器后，系统的联络线功率、电压幅值、电压相角差的

振荡都能较快得到平息, 系统的区间模式阻尼特性明显增强。因此, 所设计的光伏广域阻尼控制器能够使系统区间振荡模式得到很好的阻尼, 验证了设计方法的正确性。

5 结束语

① 本文提出基于相关辨识法的光伏广域阻尼控制器设计方法, 所采用的低阶控制器易于工程实现, 为提升系统小干扰稳定性提供了思路;

② 传统基于解析法的线性化建模方法难以适用大电网分析计算, 提出利用相关分析法辨识系统开环传递函数, 避免了大系统精确建模的困难。相较于其它小信号, 所采用的伪随机信号具有更宽的频带, 能够充分激励系统的动态特性;

③ 结合留数法与主模比指标法对反馈信号进行优选, 并将 TLS-ESPRIT 法应用到主模比指标的计算中, 能够简化计算。所提出的反馈信号选择方法同时考虑了其可控性/可观性与控制代价;

④ 仿真结果表明, 所提出的光伏广域阻尼控制器能够很好地抑制系统区间低频振荡模式, 改善互联系统主导模式阻尼特性。

参 考 文 献

- [1] 刘纯, 马烁, 董存, 等. 欧洲 3·20 日食对含大规模光伏发电的电网运行影响及启示 [J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1765-1772.
- [2] 王晓华, 张建成, 周春霞, 等. 联网光伏发电系统调度运行控制方法研究 [J]. 现代电力, 2015, 32(2): 23-28.
- [3] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
- [4] 龙源, 李国杰, 程林, 等. 利用光伏发电系统抑制电网功率振荡的研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(24): 44-49.
- [5] Li G J, Ruan S Y, Choi S S. A photo-voltaic damping system for suppressing power system oscillation [C]// Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Control and Automation. 2009: 1681-1686.
- [6] Mithulananthan N, Shah R, Lee K Y. Small-disturbance angle stability control with high penetration of renewable generations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1463-1472.
- [7] Shah R, Mithulananthan N, Lee K Y, et al. Wide-area measurement signal-based stabiliser for large-

scale photovoltaic plants with high variability and uncertainty [J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(6): 614-622.

- [8] Shah R, Mithulananthan N, Lee K Y. Large-scale PV plant with a robust controller considering power oscillation damping [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(1): 106-116.
- [9] 张立奎, 张英敏, 李兴源, 等. 柔性直流附加鲁棒阻尼控制器设计 [J]. 现代电力, 2015, 32(2): 70-75.
- [10] 刘东冉, 陈树勇, 马敏, 等. 光伏发电系统模型综述 [J]. 电网技术, 2011, 35(8): 47-52.
- [11] 熊连松, 刘小康, 卓放, 等. 光伏发电系统的小信号建模及其控制器参数的全局优化设计方法 [J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1234-1241.
- [12] 芦晶晶, 郭剑, 田芳, 等. 基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计 [J]. 电网技术, 2004, 28(15): 31-34.
- [13] 潘学萍, 温荣超, 鞠平, 等. 双馈风电机组网侧控制器参数辨识的频域方法 [J]. 电网技术, 2015, 39(3): 634-638.
- [14] 蒋平, 叶慧, 吴熙. 基于留数的静止同步补偿器附加阻尼鲁棒控制 [J]. 电网技术, 2012, 36(10): 131-135.
- [15] 吴星, 刘天琪, 李兴源, 等. 基于 WAMS/SCADA 混合量测和离散粒子群优化算法的 PMU 优化配置 [J]. 现代电力, 2014, 31(6): 10-14.
- [16] 贺静波, 李立涅, 陈辉祥, 等. 基于广域信息的电力系统阻尼控制器反馈信号选择 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(9): 6-10.
- [17] 张静, 徐政, 王峰, 等. TLS-ESPRIT 算法在低频振荡分析中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 84-88.
- [18] Kundur P. Power system stability and control [M]. New York, USA: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [19] 陈刚, 程林, 孙元章, 等. 基于综合几何指标的广域电力系统稳定器设计 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 18-22.

收稿日期: 2016-05-03

作者简介:

葛景(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源接入电网的低频振荡分析与控制, E-mail: gjnust@163.com;
都洪基(1960—), 男, 副教授, 研究方向为电力系统稳定分析与控制、继电保护等, E-mail: duhongji807@163.com;
马进(1975—), 男, 高级讲师, 研究方向为负荷建模、电力系统动态分析等。

(责任编辑: 杨秋霞)