

# 含光伏并网的弱交流系统低频振荡 协调控制策略

毕悦<sup>1</sup>, 方思瑞<sup>2</sup>, 于舒祺<sup>3</sup>

(1. 国网四川综合能源服务有限公司四川电力工程分公司, 四川 成都 610072; 2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;  
3. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059)

**摘要:** 基于中国太阳能的实际分布情况, 大规模光伏电站往往接入短路容量较低且背景谐波含量较高的弱交流送端系统。光伏的大规模并网对末端电网阻尼特性产生显著影响的同时也为低频振荡的抑制提供了新途径。在此背景下, 基于四机两区域系统建立送端电网接入大容量光伏的电磁暂态仿真模型, 并利用 TLS-ESPRIT 算法辨识系统低频振荡特性。此外, 分别针对光伏逆变器与 SVG 控制环节, 提出利用带观测器的线性二次型最优控制方法在其各自控制回路设计附加阻尼控制器, 实现对局部和全局低频振荡的协调控制。仿真结果表明, 所提控制策略具有明显抑制效果, 且能在一定程度内增大送端系统功率传输能力。

**关键词:** 弱交流系统; 低频振荡; 光伏; SVG; 协调控制

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.04.008 中图分类号: TM721 文章编号: 1673-9140(2021)04-0059-07

## Coordinated control strategy for low frequency oscillations of weak AC grid connected PV systems

BI Yue<sup>1</sup>, FANG Sirui<sup>2</sup>, YU Shuqi<sup>3</sup>

(1. Sichuan Electric Power Engineering Branch of State Grid Sichuan Comprehensive Energy Service Co., Ltd., Chengdu 610072, China;  
2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. The College of Nuclear Technology and  
Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** According to the actual distribution of solar energy in China, large-scale photovoltaic power plants frequently connect to weak delivery AC systems, which have a low short-circuit capacity but a high background harmonic content. The large capacity of photovoltaics connecting to the grid has already made a significant impact on the end grid's damping characteristics, meanwhile providing a new method to suppress low frequency oscillation. Under the background, on the basis of the four-machine two-area system, an electromagnetic transient simulation model including large-capacity photovoltaic plants is set up. And the low frequency oscillation characteristics of the system are analyzed by the total least squares-estimation of signal parameters via the rotational invariance technique (TLS-ESPRIT). Aiming at coordinately suppressing low frequency oscillation in intra-area and inter-area, the additional damping controller designed by linear quadratic regulator (LQR) control method with an observer is respectively set in the different

收稿日期: 2020-04-14; 修回日期: 2020-08-11

基金项目: 国家电网公司科技项目 (SGNXJY00GHJS1900039)

通信作者: 毕悦 (1993-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事新能源并网检测与运行控制研究; E-mail: ellenb@163.com

control loop of photovoltaic inverter and SVG. Simulation results show that the proposed method can effectively suppress the low frequency oscillation and increase the system's capability of sending power in a certain extent.

**Key words:** weak AC system; low frequency oscillation; photovoltaic; static var generator; coordinated control

近年来,中国电力系统已迅速发展成为世界上规模最大的电网之一,全网内各区域系统的互联使得低频振荡问题日益突出<sup>[1]</sup>。目前,针对传统电力系统中存在的低频振荡已有较多分析方法和抑制措施<sup>[2]</sup>,在实际工程中最为典型的应用为加装电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS),但其对于全局功率振荡抑制能力尚有限。随着规模化光伏不断接入电网,日趋增大的并网容量及渗透率会对低频振荡特性造成不同程度的影响<sup>[3-5]</sup>,但也为抑制振荡提供了更多解决途径<sup>[6-7]</sup>。文献[8]采用复数力矩系数法理论推导出光伏电站附加控制对发电机阻尼系数的有利影响,并选用自抗扰技术实现对光伏电站的有功阻尼调制;文献[9]将同步发电机角频率与功率振荡曲线进行对比分析,提出可采用线路有功功率微分信号作为光伏电站自适应阻尼控制器的反馈输入,有效解决了系统内存在的低频振荡问题;文献[10]采用极小化极大线性二次高斯方法设计光伏阻尼控制器,其针对低频振荡抑制效果好且控制鲁棒性强,但因数学模型阶数过高,不利于工程实现。

上述已有研究均未考虑模型辨识,设计过程较为复杂,且仅限于针对光伏逆变器设计附加阻尼控制器。静止无功发生器(static var generator, SVG)作为大多数已建成光伏电站必备的动态无功补偿装置,已广泛应用于新能源电站的电压控制领域<sup>[11]</sup>,实现了在电网故障情况下对系统无功和电压的快速、有效支撑<sup>[12]</sup>,但其对低频振荡的抑制能力未获得充分挖掘与利用。

基于此,考虑到光伏逆变器与 SVG 均采用全控电压源型电力电子器件,该文提出同时在 SVG 和 PV 控制回路附加阻尼控制器,并分别采用无功和有功阻尼调制原理来实现对局部和区域间低频振荡的有效抑制。基于总体最小二乘—旋转矢量不变技术(total least square-estimating signal parameter yia rotational invariance techniques, TLS-ESPRIT)辨识算法,采用带观测器的线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)方法简化受控对象复

杂程度,合理设计出协调控制器。电磁暂态仿真结果表明,所提控制策略对系统低频振荡具有明显抑制效果,且能在一定程度内增大系统在故障情况下的送出能力。

## 1 低频振荡协调控制策略

### 1.1 SVG 无功附加阻尼控制

为在电网电压薄弱处稳定电压,常就地增设 SVG 来实现无功功率快速响应和补偿。除此之外,若选择合适的附加反馈信号对 SVG 出口电压进行阻尼调制,还能成为抑制低频振荡的有效手段<sup>[13]</sup>。以典型的单机无穷大系统阐述 SVG 对低频振荡的抑制原理,如图 1 所示。

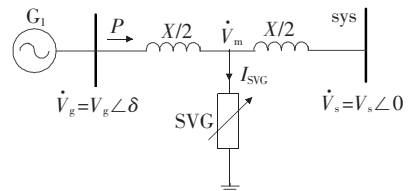


图 1 SVG 抑制低频振荡示意

Figure 1 Schematic diagram of low frequency oscillation suppressed by SVG

假设对称网络结构无有功损耗,同步发电机向联络线中点处输出的有功为

$$P_E = \frac{V_s V_m}{X/2} \sin \frac{\delta}{2} \quad (1)$$

在稳定运行点附近对式(1)作线性化处理,可得同步发电机电磁功率的线性化增量方程:

$$\Delta P_E = \frac{\partial P_E}{\partial V_s} \Delta V_s + \frac{\partial P_E}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \Delta \delta \quad (2)$$

由于无穷大节点即发电机并网点处电压幅值保持恒定,故  $\Delta V_s = 0$ 。此时,线路中点处 SVG 电压附加调制方式为

$$\Delta V_m = K_s \frac{d(\Delta \delta)}{dt} \quad (3)$$

考虑到转子动态方程在平衡点附近线性化后为

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = \Delta P_M - \Delta P_E \quad (4)$$

同时,假设原动机输出功率恒定,有  $\Delta P_M = 0$ ,则

$$\Delta P_E = -M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} \quad (5)$$

将式(3)、(5)同时带入式(2),可得到 SVG 参与电压附加调制后同步发电机输出特性的线性化方程:

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{\partial P_E}{\partial V_m} K_s \frac{d(\Delta \delta)}{dt} + \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \Delta \delta = 0 \quad (6)$$

式(6)特征方程可简化为

$$s^2 + 2\xi s + \omega_n^2 = 0 \quad (7)$$

其中,  $\xi = \frac{K_s}{2M} \cdot \frac{\partial P_E}{\partial V_m}$ 。

由式(6)可知,若仅考虑 SVG 维持正常电压恒定,不参与电压附加控制,即  $\Delta V_m = 0$  时,方程(6)的特征值将全部分布在复平面的虚轴上。当该电网受到扰动后,机组功角将进行不衰减地等幅正弦振荡。但当 SVG 按式(3)进行附加阻尼控制时,若设计合适的电压调制系数  $K_s$ ,可使式(7)特征根回落到复平面的左半平面,从而对系统受扰后产生的低频振荡做到有效阻尼。基于以上分析,在 SVG 电压控制参考值  $U_{svg\_ref}$  处,该文通过负反馈引入无功附加调制信号  $\Delta V_m = K_s \Delta \omega$ ,其中,  $K_s$  由带观测器的 LQR 方法设计得到,即可实现对低频振荡的有效抑制。

## 1.2 PV 有功附加阻尼控制

为提升发电效率,PV 电站正常并网时均处于最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式。考虑到不削弱光伏电站有功输出能力,现有低频振荡抑制策略常选择无功分量作为控制对象。但根据相关国标规定<sup>[14]</sup>,光伏逆变器必须能够实现快速的无功支撑和电压调节,无功附加阻尼调制势必会在一定程度上影响光伏电站对瞬态过电压的响应能力,特别是在光伏并入弱送端系统时,将存在电压越限的风险。为避免此种情况的发生,该文选择 PV 有功附加阻尼控制策略来实现对低频振荡的抑制,其控制框图如图 2 所示。

PV 仿真模型为两级式架构,光伏阵列出口后分别经 DC-DC 升压电路及 DC-AC 逆变回路并入

电网。采用电流内环、直流电压中环及 MPPT 控制外环的闭环结构来保证光伏电站稳定运行<sup>[15]</sup>。将最能直接体现低频振荡特性的同步发电机转子角速度偏差经 LQR 进行附加调制后,输出信号  $\Delta U_{damp}$  作用到中环电压参考值  $U_{dc\_ref}$  处,再与实测直流电压相减后送入原 PI 回路,进而得到电流内环参考值  $I_{dref}$ <sup>[8]</sup>。

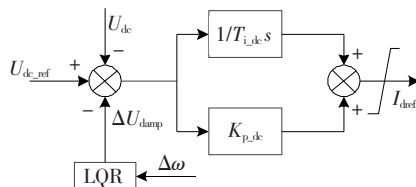


图 2 PV 有功阻尼附加控制策略示意

Figure 2 Photovoltaic plants active additional damping control strategy block diagram

## 2 控制器设计

### 2.1 系统振荡特性辨识

以四机两区域系统并入光伏电站为仿真模型,设计附加在光伏逆变器及 SVG 控制回路的阻尼控制器,如图 3 所示,其中,发电机系统包括同步机、励磁系统、带调速器的水轮机等,4 台机组额定容量均为 700 MV·A;60 MW 的 PV 电站接入送端系统,同时,SVG 作为其动态无功补偿装置和光伏电站在相同并网点接入电网,SVG 额定容量为 30 MVar;分别增大发电机 1、2 与交流汇集母线 11 之间的线路阻抗值,以增大光伏并网处的交流等效阻抗来减小区域 1 短路容量,构建弱交流送端电网。

TLS-ESPRIT 技术<sup>[16-17]</sup>在噪声情况下也能高精度辨识出电力系统各种弱阻尼振荡频率、幅值、相

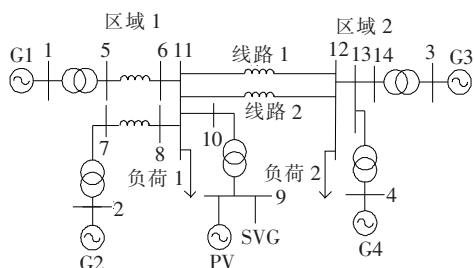


图 3 含 PV 并网的四机两区域系统结构

Figure 3 Structure diagram of four machine two regional system with connected PV station

位及阻尼比等信息,采用此技术对图3所示仿真系统进行辨识,得到的振荡特性如表1所示,可知系统存在频率为0.79 Hz的局部振荡模式和频率为0.50 Hz的全局振荡模式。同时,光伏电站与SVG的接入未引入新的振荡模式,仅让原振荡频率发生小幅度偏移,且对原系统阻尼有不同程度的提升作用。

表1 TLS-ESPRIT算法振荡模式辨识结果

Table 1 Results of oscillation modals identification with TLS-ESPRIT algorithm

振荡模式	振荡频率/Hz	阻尼比/%
原系统两区域间	0.51	3.38
原系统送端局部	0.79	14.17
光伏并网后两区域间	0.50	4.02
光伏并网后送端局部	0.79	14.43

## 2.2 带观测器的LQR控制器

在对含光伏的四机两区域仿真系统作小干扰稳定性分析时,可近似地将其考虑为线性且完全可控,故状态方程<sup>[18]</sup>可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (8)$$

其中,状态矩阵 $\mathbf{A}$ 、输入矩阵 $\mathbf{B}$ 及输出矩阵 $\mathbf{C}$ 由TLS-ESPRIT算法辨识获得。

系统二次型性能指标为

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (9)$$

式中 $\mathbf{Q}$ 为实对称正定(或半正定)矩阵; $\mathbf{R}$ 为实对称正定矩阵。等式右边第2个积分项是因考虑到控制信号会有能量损耗而引入。

假设控制信号 $\mathbf{u}(t)$ 不受条件拘束,则其最优控制解存在且唯一<sup>[19]</sup>,即

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{x}(t) \quad (10)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{P}$ 为对称正定矩阵,由退化里卡蒂代数方程求解得到,即

$$\mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (12)$$

将等式(12)解出的矩阵 $\mathbf{P}$ 代入式(11),即可得到最优控制向量 $\mathbf{u}(t)$ 的状态反馈增益矩阵 $\mathbf{K}$ 。

然而,在实际系统中,控制对象某些状态经常无法直接测量,导致系统状态不能完全可观。同时为了避免求取被控对象复杂的内部信息,该文引入观

测器以估计不可观状态。

将LQR的输出向量 $\mathbf{y}(t)$ 和控制向量 $\mathbf{u}(t)$ 作为观测器输入。观测器数学模型<sup>[20]</sup>为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{x}}} &= \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{K}_e(\mathbf{y} - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}) = \\ &(\mathbf{A} - \mathbf{K}_e\mathbf{C})\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{K}_e\mathbf{y} \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $\tilde{\mathbf{x}}$ 、 $\mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}$ 分别为观测器的状态估计和输出估计; $\mathbf{K}_e$ 为改善观测器性能的增益矩阵,经反馈后持续修正模型输出 $\mathbf{y}(t)$ 。

附加阻尼控制器希望的极点可由LQR在求解出最优反馈增益矩阵 $\mathbf{K}$ 后得到,再以此计算出观测器极点和增益矩阵 $\mathbf{K}_e$ ,代入公式直接求出基于观测器的线性最优控制器传递函数 $G(s)$ ,即

$$G(s) = \frac{U(s)}{-Y(s)} = \mathbf{K}(s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{K}_e\mathbf{C} + \mathbf{B}\mathbf{K})^{-1}\mathbf{K}_e \quad (14)$$

其控制系统整体方框如图4所示。

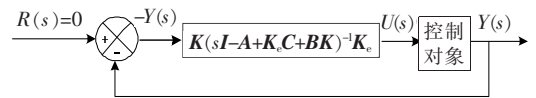


图4 基于观测器的LQR系统示意

Figure 4 System block diagram of LQR controller based observer

## 2.3 控制器参数设计

根据该文所提协调控制策略,SVG采用无功附加阻尼调制方式,仅对局部电压控制敏感,故选用其针对送端区域内低频振荡进行抑制,并优先配置该回路相关参数。设计过程:在SVG电压控制环节施加小扰动激励,取同步发电机1、2受扰前后的角速度偏差 $\Delta\omega_{12no}$ 、 $\Delta\omega_{12dis}$ 作为TLS-ESPRIT辨识算法输入,得到系统开环传递函数。依据LQR设计原则,取加权矩阵 $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ 为单位矩阵的整数倍,根据式(14)求得阻尼控制器传函 $G_{SVG}(s)$ ,并按图4所示经负反馈作用于SVG电压控制参考值处。SVG附加控制器详细传递函数为

$$G_{SVG}(s) = \frac{(8.972s^3 - 2.545s^2 + 65.8s - 142) \times 10^4}{s^4 + 50.09s^3 + 1014s^2 + 3977s + 6332}$$

当局部振荡阻尼比得到有效提升后,在PV直流电压控制回路施加0.05倍阶跃扰动,用相同设计方法和步骤,利用TLS-ESPRIT算法以同步发电机

1、3 在有扰动下的角速度偏差进行辨识,设计出如图 2 所示 PV 逆变器回路的有功阻尼控制器,其传递函数为

$$G_{PV}(s) = \frac{(1.055s^2 - 5.386s - 11.25) \times 10^4}{s^3 + 25.87s^2 + 205.8s + 374.1}$$

### 3 仿真分析

在含光伏并网的四机两区域系统(图 3)中附加设计出的 SVG 侧无功阻尼控制器和 PV 侧有功阻尼控制器,并以典型扰动工况验证所提低频振荡协调控制策略的可行性。

#### 3.1 交流母线瞬时接地

送端母线即节点 11 在 2 s 时受到瞬时三相非直接接地扰动,0.05 s 后扰动消除。在该工况下,原系统单独在 SVG 处附加 LQR 阻尼控制器以及同时在 SVG 和 PV 处附加协调控制器时,系统内各同步发电机间的转子角速度偏差及交流线路 1 传输的有功分别如图 5~7 所示。

由图 5~7 仿真波形可知,SVG 处的无功附加控制器可较好地阻尼区域 1 内的局部振荡模式,但对于送、受两系统间的振荡模式,甚至使振荡幅值在一定程度上增大。故应按该文所提控制策略,在光伏逆变器回路同时附加有功阻尼控制器,以改变两区域间的传输功率和系统潮流分配,进而抑制全局功率振荡。结合图 6、7 仿真结果,表明协调控制器能快速阻尼区域间振荡,较好地增强了全系统稳定性。

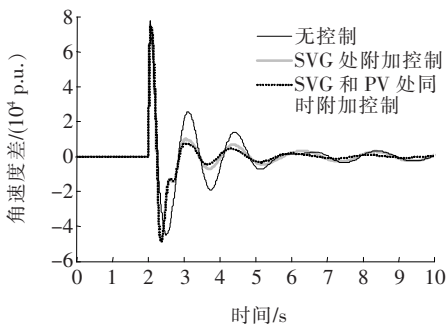


图 5 三相接地时同步发电机 1、2 角速度差

Figure 5 Angular velocity difference of generator 1 and 2 with a three-phase ground fault

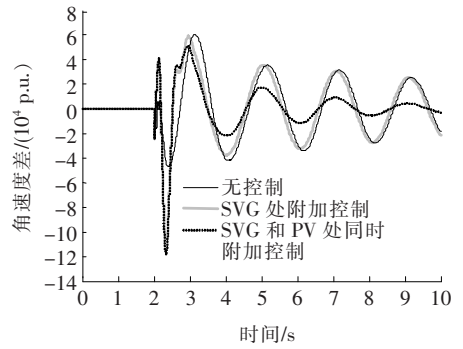


图 6 三相接地时同步发电机 1、3 角速度差

Figure 6 Angular velocity difference of generator 1 and 3 with a three-phase ground fault

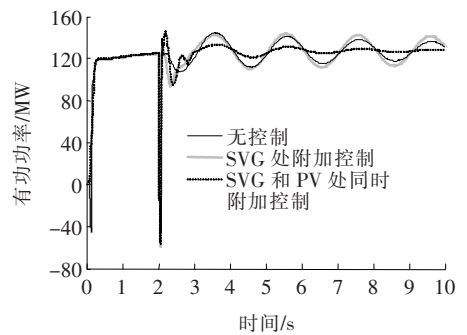


图 7 三相接地时送出线路 1 有功功率

Figure 7 Active power of send line 1 with a three-phase ground fault

#### 3.2 送出容量增加

若区域间传输功率发生低频振荡,则会在较大程度上阻碍联络线路的送出能力。在节点 11、12 处通过改变送、受端负荷比重,持续增大送出交流线路传输容量,同时施加与文 3.1 中相同的接地故障,以验证所设计控制器在不同工况下对阻尼低频振荡的鲁棒性,仿真结果如图 8、9 所示。

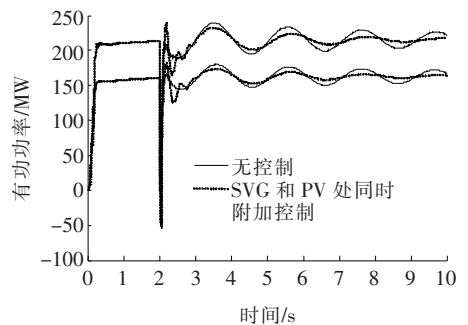


图 8 送出容量增大时线路 1 传输有功

Figure 8 Active power of AC line 1 when delivery capacity increases

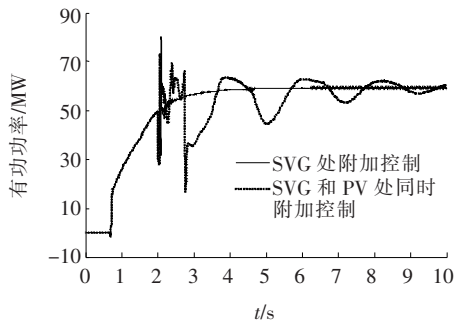


图9 送出容量增大到220 MW时PV电站并网有功

Figure 9 Grid-connected active power of PV station when delivery capacity increases to 220 MW

由图8可知,在交流联络线传输容量不断增大且发生三相接地故障时,协调控制器仍能很好地抑制区域间传输线路上的低频振荡。图9为线路1送出容量增大到220 MW时PV注入电网的有功变化情况,表明由于在光伏逆变器控制回路附加有功阻尼控制器,光伏电站能及时跟随并响应整个系统内的功率振荡,快速抑制联络线上的有功波动,同时也表明该协调控制策略能增大送端电网在受扰情况下的功率传输能力。

## 4 结语

该文根据光伏逆变器和静止无功发生器控制原理,提出同时在SVG处附加无功阻尼控制器和在PV逆变器处附加有功阻尼控制器来实现对局部和全局低频振荡进行抑制的协调控制策略。设计基于TLS-ESPRIT辨识算法,同时结合线性二次型最优控制器和观测器的控制思想,避免了求取被控系统内部不可观测状态和精确数学模型,有效提高了设计可行性且合理配置出控制器相关参数。在含光伏并网的弱送端系统中进行仿真分析,结果表明:在系统故障时,基于线性最优控制的协调控制器在一定程度上可增大送端输出能力,且对全局低频振荡具有较满意的抑制效果。

### 参考文献:

- [1] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 134.
- [2] 宋墩文, 杨学涛, 丁巧林, 等. 大规模互联网低频振荡分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 22-

28.

- SONG Dunwen, YANG Xuetao, DING Qiaolin, et al. A survey on analysis on low frequency oscillation in large-scale interconnected power grid and its control measures [J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 22-28.
- [3] 和萍, 武欣欣, 陈婕, 等. 含风电和光伏发电的综合能源系统的低频振荡[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 20-27.
- HE Ping, WU Xinxin, CHEN Jie, et al. Low frequency oscillation of an integrated energy system with wind and solar power generation [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 20-27.
- [4] 李永刚, 严风, 周一辰. 基于降阶模型的光伏发电系统振荡模式分析[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 61-68.
- LI Yonggang, YAN Feng, ZHOU Yichen. Analysis of oscillation modes based on reduced model of photovoltaic power generation system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 61-68.
- [5] Shah R, Mithulananthan N, Bansal R C. Oscillatory stability analysis with high penetrations of large-scale photovoltaic generation [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 65: 420-429.
- [6] Quintero J, Vittal V, Heydt G T, et al. The impact of increased penetration of converter control-based generators on power system modes of oscillation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2248-2256.
- [7] 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.
- DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [8] 马燕峰, 蒋云涛, 陈磊, 等. 光伏电站自抗扰附加阻尼控制抑制低频振荡策略研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1741-1747.
- MA Yanfeng, JIANG Yuntao, CHEN Lei, et al. An ADRC additional damping control strategy research on low frequency oscillation suppression of photovoltaic plants [J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1741-1747.
- [9] 周林, 任伟, 余希瑞. 大型光伏电站抑制低频振荡的有功阻尼控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2987-2995.

- ZHOU Lin, REN Wei, YU Xirui. Active damping control strategy in the large-scale photovoltaic plants restraining low-frequency oscillations[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2987-2995.
- [10] 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.
- [11] 高晓帆, 田书, 常永强. 一种新的大型光伏并网系统稳定性分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 26-32.
- GAO Xiaofan, TIAN Shu, CHANG Yongqiang. A novel stability analysis method for large-scale photovoltaic system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 26-32.
- [12] 郑涛, 黄予园, 宗伟, 等. 光伏并网系统故障二次谐波产生机理及其对变压器保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 13-22.
- ZHENG Tao, HUANG Yuyuan, ZONG Wei, et al. Second harmonic generation mechanism of a photovoltaic grid-connected system fault and its influence on transformer protection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 13-22.
- [13] 杨蕾, 甘维公, 李胜男, 等. DFIG 风电机组协同 SVG 抑制电网低频振荡方法[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 175-184+201.
- YANG Lei, GAN Weigong, LI Shengnan, et al. Method of DFIG cooperating with SVG to suppress low-frequency oscillation in power systems[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 175-184+201.
- [14] GB/T 19964—2012. 光伏发电站接入电力系统技术规范[S].
- [15] Ge Y, Du W, Wang H F, et al. Robustness of photovoltaic system based stabilizer to mitigate inter-area oscillation in a multi-machine power system[C]//IEEE 48th International Universities Power Engineering Conference, Dublin, Ireland, 2013.
- [16] Tripathy P, Srivastava S C, Singh S N. A modified TLS-ESPRIT-based method for low-frequency mode identification in power systems utilizing synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 719-727.
- [17] 丁铭, 陈红卫. 基于 APFFT 和快速 TLS-ESPRIT 的间谐波检测方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(17): 121-127.
- DING Ming, CHEN Hongwei. An inter-harmonic detection method based on APFFT and fast TLS-ESPRIT[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(17): 121-127.
- [18] Katsuhiko Ogata. Modern control engineering [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2010: 466-469.
- [19] Mishra S, Malleshham G, Sekhar P C. Biogeography based optimal state feedback controller for frequency regulation of a smart microgrid[J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2013, 4(1): 628-637.
- [20] 毕悦, 刘天琪, 李保宏. 基于改进 LQR 的交直流低频振荡协调控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(5): 80-85.
- BI Yue, LIU Tianqi, LI Baohong. Coordinated control strategy for AC/DC low-frequency oscillations based on improved LQR[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(5): 80-85.