

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210215

# 风光火打捆外送系统 STATCOM-POD 协调优化设计

和萍, 方祺元, 武小鹏, 陶玉昆, 宫智杰

(郑州轻工业大学电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 风电和光伏与火电打捆外送是我国大型新能源基地电力外送的重要途径。针对风光火打捆外送系统低频振荡问题, 提出一种基于静止同步补偿器附加功率振荡阻尼控制协调优化设计策略。首先, 搭建了风光火打捆外送系统模型, 设计了 STATCOM-POD 控制器, 并采用联络线有功功率作为控制器输入量。然后, 基于李雅普诺夫稳定法则构建了计及系统所有低频振荡模式最小阻尼比的目标函数。最后, 采用遗传算法对多控制器参数进行协调优化, 改善了系统低频振荡特性。以 IEEE 四机二区域系统为例, 验证所提方法的正确性和有效性。结果表明: 协调优化参数的 STATCOM-POD 控制器能够维持发电机转速的稳定, 增加系统的阻尼, 抑制低频振荡引起的电网参数波动, 改善风光火打捆外送系统的低频振荡特性。

**关键词:** 风光火打捆外送; 协调优化; 阻尼特性; STATCOM-POD; 低频振荡

## Coordinated optimization design of STATCOM-POD for a wind-PV-thermal-bundled power transmission system

HE Ping, FANG Qiyuan, WU Xiaopeng, TAO Yukun, GONG Zhijie

(College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Wind and PV power bundled with thermal power and then transmitted is an important approach to delivering power for large renewable power bases. There is a low-frequency oscillation problem of the wind-PV-thermal-bundled power transmission system. Thus a coordinated optimization design strategy based on STATCOM additional POD control is proposed. First, the model of the wind-PV-thermal-bundled power system is built, and the STATCOM-POD controller is designed. The active power of the tie-line is used as the input of the controller. Secondly, based on the Lyapunov stability method, the objective function considering the minimum damping ratio of all low-frequency oscillation modes is constructed. Finally, a genetic algorithm is used to coordinate and optimize the multiple controller parameters to improve the low-frequency oscillation characteristics of the system. With the IEEE 4-machine 2-area system as an example, the correctness and effectiveness of the proposed method are verified. The results show that the stability of the generator speed can be maintained using the STATCOM-POD controller with optimized parameters, the system damping is increased, the fluctuation of power network parameters caused by low frequency oscillation is suppressed, and the low-frequency oscillation characteristic of the wind-PV-thermal-bundled power transmission system is improved.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51607158).

**Key words:** wind-PV-thermal-bundled power transmission; coordinated optimization; damping characteristic; STATCOM-POD; low-frequency oscillation

## 0 引言

近年来我国能源需求增长迅速, 能源生产和消

费面临转型。国家发展改革委和国家能源局发布的《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》中提出, 2021年到2030年, 非化石能源占比达到20%左右, 到2050年, 非化石能源占比将超过一半<sup>[1]</sup>。我国可再生能源主要集中在“三北地区”, 且发电能力增长率远高于当地负荷增长率, 本地消纳已饱和, 大规模新能源亟需跨区外送。风光火打捆外送可以削弱

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51607158); 河南省科技攻关研究项目资助(202102210305); 郑州轻工业大学重点培育计划项目资助(2020ZDPY0204)

由于风能、太阳能波动引起的不利影响, 比单纯送风电或者光伏出力更平滑、更可控, 搭配煤电、配合储能, 提高了远距离输送的稳定性。大型新能源基地特高压配套风光火打捆外送已是大势所趋, 这对我国 2030 年前实现碳排放达峰、2060 年前实现碳中和目标具有重要意义<sup>[2]</sup>。

围绕风光火打捆系统, 国内外学者已开展研究, 并取得了一定的成果。文献[3]系统研究了大型能源基地风光火打捆外送的可行性问题。结果表明, 在保证电力系统安全稳定运行的基础上, 优化风电和光伏的装机容量可以在很大程度上减少弃风、弃光比例。文献[4]建立了风光火打捆交直流混联外送系统模型, 并基于风电和光伏并网点短路容量、能量守恒定律以及不平衡功率再分配特性, 研究了配套火电对直流、风电、光伏以及联网交流系统的影响机理。文献[5]构建了计及新能源穿透功率极限、出力反调峰和大波动风险的风光火打捆系统多目标优化配置模型, 以保证输电工程的安全运行。此外, 大规模风能和太阳能接入会对传统电力系统带来负面的影响<sup>[6-9]</sup>。风电机组和光伏电站与同步发电机相互作用可以改变系统功率潮流并影响系统的阻尼特性, 使电力系统在受到干扰时会由于阻尼减小极易受到低频振荡的影响。风力发电和光伏发电的随机波动也将显著增加电力系统不平衡潮流发生的概率, 诱发更多振荡难题<sup>[10-12]</sup>。因此, 改善风光火打捆外送系统的阻尼特性显得尤为重要。

同步火力发电机组励磁系统附加电力系统稳定器(Power System Stabilizer, PSS)可以有效地抑制常规电网低频振荡的发生, 但风力发电与光伏发电的结合会拓宽系统的特征值范围, 仅用 PSS 很难提高区域间振荡的小干扰稳定性<sup>[13-14]</sup>。柔性交流输电(Flexible AC Transmission Systems, FACTS)装置附加阻尼控制同样可以抑制低频振荡, 并因其安装地点的灵活性及良好的动态性能给抑制区域间振荡提供了新手段, 越来越多学者将 FACTS 装置应用于新能源电力系统中<sup>[15-16]</sup>。静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)是 FACTS 中的重要组成部分, 作为近年来热门的并联型无功补偿装置, STATCOM 可以快速地控制电压幅值和精确控制相位角, 具有改善系统阻尼以及系统电压分布的特性, 在增强系统阻尼并且抑制系统区域间振荡中起着关键的作用<sup>[17]</sup>。针对 STATCOM 及其附加阻尼控制器设计问题已有学者取得一定进展。文献[18]基于电气转矩分析法通过建立含静止同步补偿器的单机无穷大电网机电尺度数学模型, 分析了静止同步补偿器在电网功率振荡抑制模式下影响同步

发电机动态特性的物理机制, 解释了不同控制策略影响电网等效惯性系数、同步系数与阻尼系数的原理。文献[19]基于模态控制理论相位补偿法, 设计了含风电系统的静止同步补偿器功率振荡阻尼控制器, 使 STATCOM 能吸收风电系统中的振荡能量, 提高系统阻尼。文献[20]分析了 STATCOM 并联等效电阻抑制双馈风电场次同步谐振的机理, 并提出抑制次同步振荡的附加控制策略。文献[21]在风机系统中加装 STATCOM 并提出一种基于自抗扰的控制方法, 通过粒子群优化算法对控制器参数进行优化, 在保证电压稳定的同时有效抑制了系统低频振荡。

基于以上研究, 本文提出一种 STATCOM 附加功率振荡阻尼控制器(Power Oscillation Damping, POD)的协调优化控制策略以改善风光火打捆外送系统低频振荡特性。采用电流注入型 STATCOM, 以线路有功功率作为 POD 输入信号; 基于李雅普诺夫稳定法则, 采用 QR 法求取系统全部特征值; 构建计及系统所有低频振荡模式最小阻尼比的目标函数; 采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)对所设计 STATCOM-POD 参数进行全局协调优化; 最后在风光火打捆外送系统中, 采用特征值分析和时域仿真研究了所提 STATCOM-POD 协调优化控制策略对电网低频振荡特性和鲁棒性的影响。

## 1 风光火打捆交流外送系统建模

### 1.1 风电机组轴系模型

双馈感应风力发电机组(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)为现在应用最广泛的机型, 其轴系传动装置采用两质量块模型<sup>[22-23]</sup>。其数学模型主要包括风速模型、桨距角控制、风功率模型、机械传动部分、感应发电机、转速控制以及变换器控制<sup>[24]</sup>, 如图 1 所示。

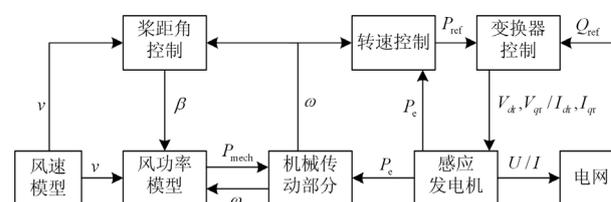


图 1 双馈感应风力发电机

Fig. 1 Doubly fed induction wind turbine generator

图 1 中:  $v$  为风速;  $\beta$  为桨距角;  $P_{\text{mech}}$  为风电机组从风中获取的能量转化成的风电机组机械功率;  $\omega$  为发电机的角速度;  $P_e$  为发电机的电磁功率;  $P_{\text{ref}}$  和  $Q_{\text{ref}}$  分别为有功和无功功率的参考值;  $V_{\text{dr}}$ 、

$V_{qr}$ 、 $I_{dr}$ 、 $I_{qr}$  分别为转子电压和电流的  $d$  和  $q$  轴分量； $U$  和  $I$  分别为发电机的输出电压和输出电流。

风机运行点随风速变化而变化，为了平稳风轮机输出，并且保证风能的利用效率，需要对桨距进行调节。调节方程为<sup>[25]</sup>

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{T_\beta}(\beta_{ref} - \beta) \quad (1)$$

式中： $\beta_{ref}$  为桨距角参考值； $T_\beta$  为桨距控制系统的惯性时间常数。

风力发电机组空气动力学数学模型为

$$P_{mech} = \rho C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 v^3 / 2 \quad (2)$$

$$\lambda = \omega R / v \quad (3)$$

式中： $\rho$  为空气密度； $R$  为风力机叶轮半径； $\lambda$  为叶尖速比； $C_p$  为叶片的风能转换效率系数，是  $\lambda$  与  $\beta$  的函数，改变  $\lambda$  与  $\beta$  可以改变  $C_p$  的大小。当叶尖速比达到最大值  $\lambda_{max}$  时，风能转换效率系数也将达到其最大值  $C_{pmax}$ 。DFIG 在  $d-q$  坐标轴下的 4 阶数学模型可参考文献[26]。

### 1.2 光伏电站模型

光伏阵列将捕获来的光能转化为直流电能，然后通过逆变器转化为交流电能，最后汇入电网。光伏电站的数学模型如图 2 所示。

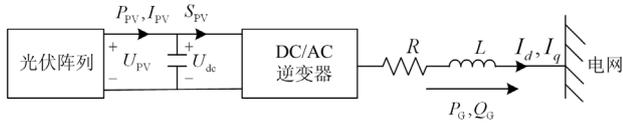


图 2 光伏电站模型

Fig. 2 Photovoltaic power station model

图 2 中： $P_{PV}$ 、 $I_{PV}$ 、 $U_{PV}$ 、 $S_{PV}$  分别为光伏阵列的输出功率、电压、电流和视在功率； $U_{dc}$  为稳压电容两端的电压；逆变器输出的电能通过  $RL$  滤波器并入电网； $I_d$  和  $I_q$  分别为并网电流的  $d$  和  $q$  轴分量； $P_G$  和  $Q_G$  分别为并网功率的有功和无功分量。

基于光伏电池特性的等效电路如图 3 所示。

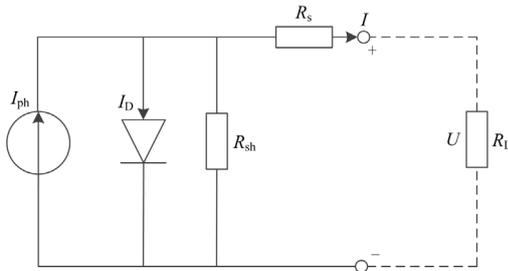


图 3 光伏电池等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of photovoltaic cell

图 3 中： $U$  和  $I$  分别为光伏阵列的输出电压和电流； $I_{ph}$  为光生电流； $I_D$  为二极管电流； $R_L$  为外接负载电阻； $R_s$  和  $R_{sh}$  分别为等效串联电阻和并联电阻。基于上述电路，由基尔霍夫定律，同时考虑到  $R_s$  很小  $R_{sh}$  很大，光伏阵列的  $U-I$  输出特性方程可写为

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_0 (e^{q(U+IR_s)/n_s nkT} - 1) \quad (4)$$

式中： $I_0$  为二极管反向饱和电流； $n_p$  和  $n_s$  分别为光伏阵列中光伏组件的并联数和串联数； $q$  为电子电荷， $q = 1.6 \times 10^{-19} C$ ； $k$  为玻耳兹曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ ； $T$  为绝对温度； $n$  为光伏电池的理想因数。

### 1.3 风光火打捆系统

风光火打捆外送系统的送端系统由大规模的火电机组、风电机组和光伏电站组成，经交流或直流输电线路与受端无穷大系统相连。风光火打捆外送系统示意图如图 4 所示。

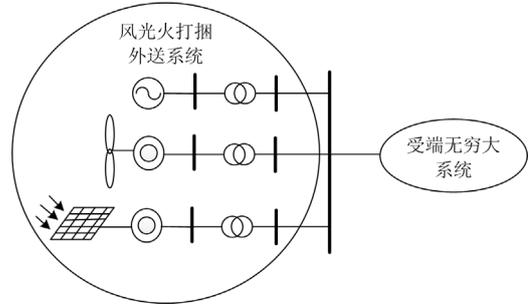


图 4 风光火打捆外送系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of wind-PV-thermal-bundled power transmission system

## 2 STATCOM-POD 设计

### 2.1 STATCOM 模型

STATCOM 是一种并联型无功补偿 FACTS 装置，其控制系统基本功能是产生脉宽调制触发脉冲控制开关装置，它可以根据电网安全稳定运行的要求，调整注入电流，得到电网预期的运行参数，从而保证安全稳定运行。STATCOM 的电流始终保持与母线电压正交，只有无功功率在电力系统和 STATCOM 之间转换。本文采用 STATCOM 电流注入模型<sup>[27-28]</sup>，如图 5 所示，可以将 STATCOM 等效为一个时间常数调节器，其节点注入无功功率  $Q$  和注入电流  $i_{SH}$  可以表示为

$$\begin{cases} \dot{i}_{SH} = [K_r(V_{ref} + V_s^{POD} - V_i) - i_{SH}] / T_r \\ Q = i_{SH} V_i \end{cases} \quad (5)$$

式中： $V_{ref}$  为参考电压； $V_i$  为节点测量电压； $V_s^{POD}$  为 POD 输出信号； $K_r$ 、 $T_r$  分别为 STATCOM 电压调节器增益及其时间常数； $i_{SH}$  为 STATCOM 节点注入电流； $\dot{i}_{SH}$  为  $i_{SH}$  的一阶微分。

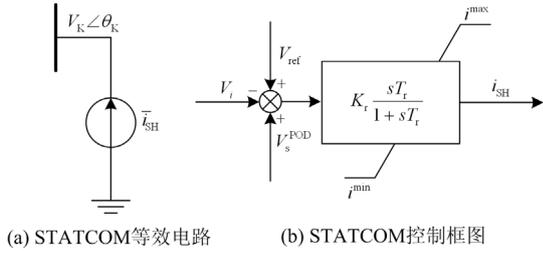


图 5 STATCOM 等效电路和控制框图

Fig. 5 STATCOM circuit and control block diagram

## 2.2 附加功率振荡阻尼器

附加功率振荡阻尼控制可以改善系统阻尼特性, 提高系统抗干扰能力。本文设计 POD 包括放大、隔直、相位补偿、限幅环节, 其传递函数为

$$G(s) = K_{\text{POD}} \frac{sT_w}{1+sT_w} \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \frac{1+sT_3}{1+sT_4} \quad (6)$$

式中:  $K_{\text{POD}}$  为 POD 的放大倍数;  $T_w$  为隔直环节的时间常数;  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$  为超前-滞后时间常数。通过附加 POD 控制可以使 STATCOM 最大限度地输出或吸收无功功率, 增大系统阻尼, 有效抑制低频振荡, 改善系统运行特性。

设计的 STATCOM-POD 控制框图如图 6 所示, 在 STATCOM 交流电压控制部分添加附加控制信号, 并加入限幅环节用于限制控制环节产生调节信号的调节幅度以避免超调。POD 输入信号可根据情况选取线路有功功率、无功功率、电流幅值、电压等, 本文选择线路有功功率  $P_L$  作为 STATCOM-POD 输入信号。

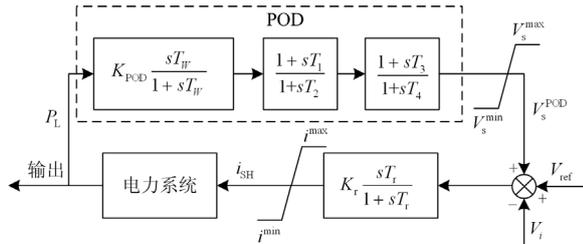


图 6 STATCOM-POD 控制框图

Fig. 6 Control block diagram of STATCOM-POD

## 3 协调优化算法

### 3.1 优化目标与约束条件

电力系统的状态空间表达式可由一组微分代数方程表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{x}$  为描述系统动态过程的状态变量;  $\mathbf{y}$  为系统

中的代数变量。将式(7)在系统稳定工作点  $(x_0, y_0)$  处展开成泰勒级数可得系统的线性化模型为

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla_x \mathbf{f} & \nabla_y \mathbf{f} \\ \nabla_x \mathbf{g} & \nabla_y \mathbf{g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $\nabla_x \mathbf{f} = \partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) / \partial \mathbf{x}$  为  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  的梯度, 其他符号的定义类似。由于  $\nabla_x \mathbf{g}$  非奇异则式(8)可表示为

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \left[ \mathbf{A}_1 - \mathbf{B}_1 (\mathbf{C}_1)^{-1} \mathbf{D}_1 \right] \Delta \mathbf{x} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{A}$  为系统的状态矩阵, 可由分析系统状态矩阵的特征值对系统的小干扰稳定进行分析。

由李雅普诺夫稳定法则, 若  $\mathbf{A}$  矩阵的所有特征值都具有负实部, 则非线性系统在平衡点处渐进稳定。因此如图 7 所示, 一个小干扰稳定的电力系统其特征根应全部位于复平面左半平面, 设  $\lambda_c = \alpha_c + j\omega_c$  为该电力系统离虚轴最近的特征根,

$\xi_c$  为其阻尼比,  $\xi_c = -\alpha / \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \times 100\%$ , 则  $\xi_c$  在该电力系统的所有低频振荡模式中最小, 如果设计一组合理的控制参数使  $\xi_c$  在保证系统稳定的前提下尽可能大, 就可以使  $\lambda_c$  远离虚轴, 那么该电力系统的小干扰稳定就能够得到足够保证。

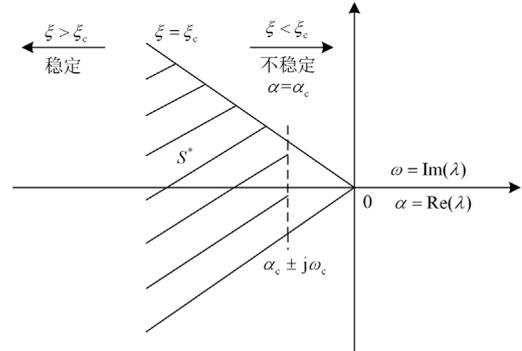


图 7 期望特征值的分布区域

Fig. 7 Desired eigenvalue distribution region

本文的目标函数可表示为

$$f = 1 / \min \xi_i^D \quad (10)$$

式中:  $i$  为低频振荡模式的集合;  $D$  为算法的迭代次数。优化仿真的目标是使阻尼比尽可能大, 优化问题可表述为

$$\begin{aligned} & \min f \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \alpha_i < 0 \\ K_{\text{POD}}^{\min} \leq K_{\text{POD}} \leq K_{\text{POD}}^{\max} \\ K_r^{\min} \leq K_r \leq K_r^{\max} \\ T_w^{\min} \leq T_w \leq T_w^{\max} \\ T_n^{\min} \leq T_n \leq T_n^{\max} \quad (n=1, 2, 3, 4) \\ T_r^{\min} \leq T_r \leq T_r^{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

式中： $\alpha_i$  为系统所有低频振荡模式特征值的实部；参数  $K_r$ 、 $K_{POD}$ 、 $T_W$ 、 $T_r$ 、 $T_n$  为待优化参数； $K_{POD}$  的取值范围为  $[-2, 2]$ ； $K_r$  的取值范围为  $[1, 60]$ ； $T_W$  的取值范围为  $[1, 20]$ ； $T_r$ 、 $T_n$  的取值为  $[0.01, 1]$ ，阻尼比的最大值是  $1^{[29]}$ 。

### 3.2 优化流程

本文采用遗传算法协调优化阻尼控制器参数，算法迭代次数设为 800，种群数量为 200，适应度期望值为低频振荡模式最小阻尼比大于 18.5%。遗传算法选择函数设为随机均匀函数，交叉概率为 0.8，变异函数选择高斯函数。协调优化流程如图 8 所示。

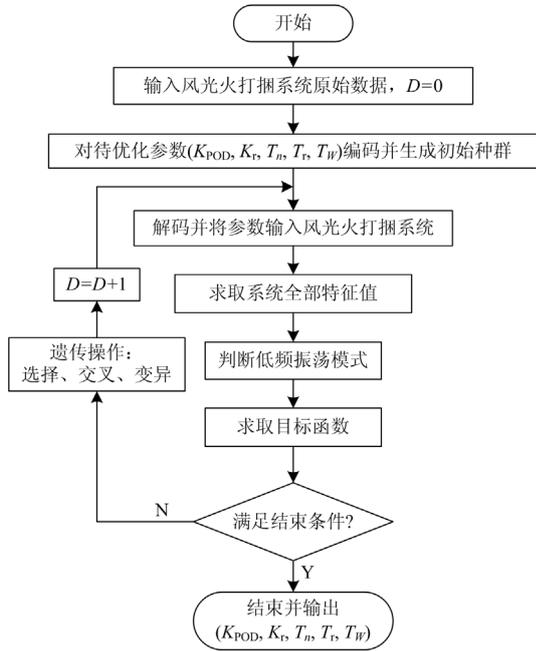


图 8 协调优化流程图

Fig. 8 Flowchart of coordination optimization algorithm

1) 将风光火打捆外送系统仿真数据输入，将 STATCOM 与 POD 初值导入算法并确定待优化参数。

2) 对待优化控制器参数进行编码，遗传算法生成初始种群。选取迭代精度，分解每个变量为  $(b_j - a_j) \times 10^4$  个部分，设任意一个待优化变量  $x_j$  的区间为  $[a_j, b_j]$ ，其二进制串位数为  $m_j$ ，其大小可由式 (12) 计算。

$$2^{m_j - 1} < (b_j - a_j) \times 10^4 \leq 2^{m_j} - 1 \quad (12)$$

3) 对种群进行解码，从二进制返回实际的值可用式 (13) 来实现，其中  $decimal(substring_j)$  代表变量的十进制值。

$$x_j = a_j + decimal(substring_j) \times \frac{b_j - a_j}{2^{m_j} - 1} \quad (13)$$

4) 求取系统全部特征值。

(1) 将随机生成的控制器参数输入系统，使用牛顿-拉夫逊法计算系统潮流。

(2) 采用李雅普诺夫线性化方法，将系统在稳定点附近线性化，得到系统的线性化模型并求取系统  $A$  矩阵。

(3) 采用 QR 法求取系统全部特征值。

5) 筛选低频振荡模式。利用机电回路相关比判断与  $\Delta\omega$ 、 $\Delta\delta$  变量强相关的根，确定低频振荡模式。

6) 求取低频振荡模式阻尼比，挑选出最小阻尼比  $\xi_c^D$ ，形成目标函数。

7) 判断适应度是否大于期望值或者迭代次数达到最大。

(1) 若  $D > 800$  或适应度大于期望值则输出参数  $K_r$ 、 $K_{POD}$ 、 $T_W$ 、 $T_r$ 、 $T_n$ 。

(2) 若  $D < 800$  或适应度小于期望值则进行遗传操作，通过选择、交叉和变异产生新的染色体群体并进入步骤 3) 来进行下一次循环，此时  $D = D + 1$ 。

## 4 算例与仿真

本文采用如图 9 所示的风光火打捆外送系统。该系统包括送端系统和受端系统，通过交流输电线路连接。送端系统为风光火打捆外送系统，包括火电机组、风电机组和光伏电站。为便于分析，本文采用风机、光伏单机模型代替风电场、光伏电厂的集总模型。受端系统为 IEEE 四机二区系统，详细参数见文献 [30]。

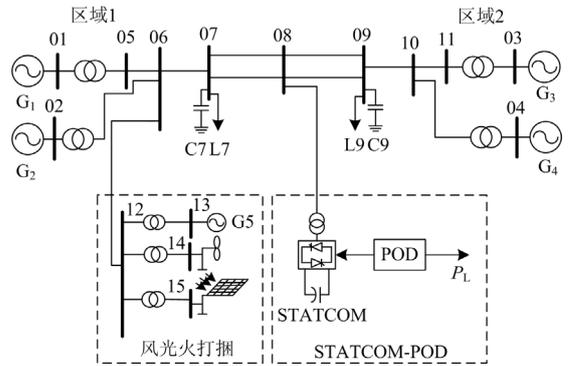


图 9 风光火打捆外送系统仿真模型

Fig. 9 Simulation model of wind-PV-thermal-bundled power transmission system

发电机组基准容量设置为 100 MVA，频率为 50 Hz，联络线传输功率为 400 MW。由于四机二区系统是一个弱阻尼系统，本文在初始系统中加入 II 型调速器和 III 型自动电压调整器。

风光火打捆接入母线 06，风机出力为 30 MW，光伏出力为 40 MW，火电机组出力 300 MW，此时

风光火打捆输送功率为系统负荷总功率的 13.21%。在母线 08 处将 STATCOM 加入系统, STATCOM 的容量为 100 MVA, 选取联络线上的功率信号作为反馈信号。

#### 4.1 参数优化及仿真结果

应用所提出的优化算法寻找 STATCOM-POD 参数的最优解。为了评估参数优化后控制器的性能, 对系统进行了特征值分析与时域仿真。系统的特征值计算结果如表 1 所示。系统有 5 个低频振荡模式: 模式 1 为区域 2 的区域内振荡模式; 模式 2 为区域 1 的区域内振荡模式; 模式 3 和模式 4 为区域 1 与区域 2 之间的区域间振荡模式; 模式 5 为全局振荡模式。无 STATCOM-POD 控制时, 模式 4 的阻尼比在 5 个机电振荡模式中最小。随着控制器的加入以及优化, 系统振荡模式的最小阻尼比不断增大, 优化后系统的最低阻尼比比较优化前提高了约 28%, 比未接入控制器时最低阻尼比提升了约 57%, 这说明所设计优化算法能有效提高系统阻尼比, 增强系统稳定性。

表 1 系统低频振荡模式

Table 1 Low-frequency oscillation modes of the power system

振荡模式	特征根	阻尼比/%	频率/Hz	相关机组	
原系统	1	-1.174 4+j7.260 1	15.97	1.155 5	G <sub>3</sub> ,G <sub>4</sub>
	2	-1.376 0+j6.394 4	21.04	1.017 7	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub>
	3	-0.821 8+j4.811 6	16.84	0.765 8	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub> ,G <sub>5</sub>
	4	-0.438 8+j3.683 2	11.83	0.586 2	G <sub>3</sub> ,G <sub>5</sub>
	5	-0.368 9+j0.779 6	42.77	0.124 1	G <sub>1</sub> -G <sub>5</sub> ,DFIG
优化前	1	-1.206 2+j7.343 6	16.21	1.168 8	G <sub>3</sub> ,G <sub>4</sub>
	2	-1.293 0+j6.329 9	20.01	1.007 4	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub>
	3	-0.914 6+j4.868 2	18.46	0.774 8	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub> ,G <sub>5</sub>
	4	-0.571 1+j3.884 0	14.55	0.618 2	G <sub>3</sub> ,G <sub>5</sub>
	5	-0.374 8+j0.775 1	43.87	0.123 4	G <sub>1</sub> -G <sub>5</sub> ,DFIG
优化后	1	-1.376 2+j7.227 7	18.70	1.150 3	G <sub>3</sub> ,G <sub>4</sub>
	2	-1.226 1+j6.479 1	18.59	1.031 2	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub>
	3	-0.948 7+j4.716 6	19.72	0.750 7	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub> ,G <sub>5</sub>
	4	-0.838 5+j3.808 6	21.50	0.606 2	G <sub>3</sub> ,G <sub>5</sub>
	5	-0.372 8+j0.772 6	43.46	0.123 0	G <sub>1</sub> -G <sub>5</sub> ,DFIG

假设双回联络线 07 和 08 中的 1 回在  $t=1.0$  s 时发生三相短路故障, 故障清除时间为 0.2 s, 线路在 1.2 s 时重新投入运行, 仿真时间为 15 s。在三相短路故障时, 图 10 给出发电机组的响应曲线, 其中图例分别代表以下内容。

- 1: 未接入控制器系统;
- 2: 接入控制器, 未优化参数系统;
- 3: 控制器参数优化系统。

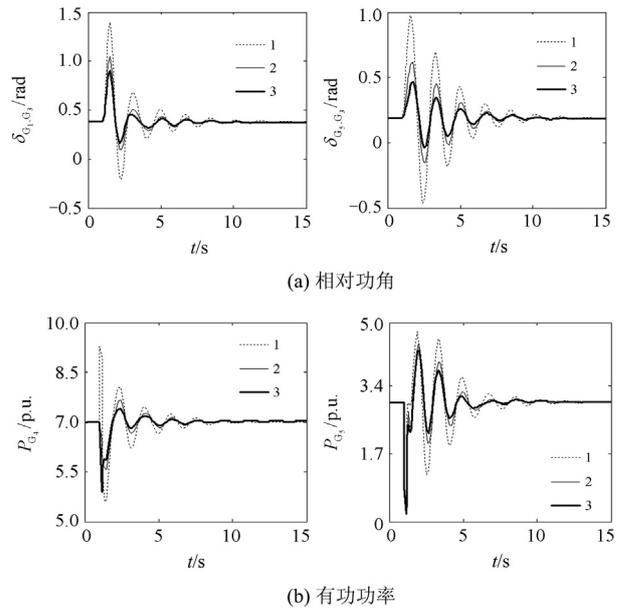


图 10 系统三相短路响应曲线

Fig. 10 System response curves of three-phase short circuit

由图 10 可知, 系统接入 STATCOM-POD 控制并优化时系统的动态时域曲线振荡有所改善。图 10(a)中  $G_1$  的相对功角曲线在  $t=1.5$  s 振荡幅度达到最大, 原始系统最大振幅为 1.4 rad, 系统接入控制器并经过算法优化后系统最大振幅降低为 0.8 rad, 较原始系统降低了 0.6 rad。通过对比图 10(b)中的曲线也可以发现, 经过优化后, 有功功率振荡衰减速度更快, 振荡幅度更小, 改善了系统扰动后火力发电机组有功功率振荡的情况, 从而进一步说明采用优化算法生成的参数能够改善系统的稳定性。

#### 4.2 改变联络线传输功率

为更好地验证 STATCOM-POD 控制器与所提优化算法对风光火打捆系统稳定性的改善作用, 在不同工况下对其进行仿真验证。本节运行工况为: 区域 1 向区域 2 送电, 风光火打捆系统在送电侧, 风电出力 30 MW、光伏出力 40 MW、风光火之间电气距离为 50 km, 通过改变区域 1 中同步发电机组的出力, 研究加装 STATCOM-POD 控制器时不同联络线传输功率对区域间振荡模式的影响。

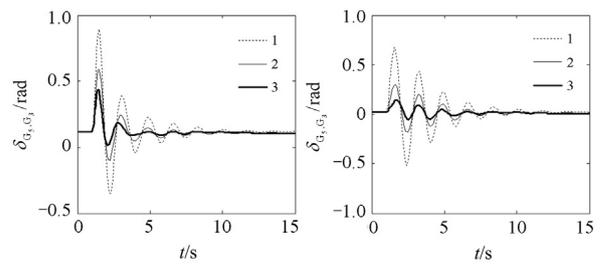
表 2 给出随着联络线功率变化区域间振荡模式的变化情况, 从表 2 可知, 随着联络线功率从 400 MW 逐渐降低到 250 MW, 系统低频振荡模式的振荡频率和阻尼比均有所改变。通过对比优化 STATCOM-POD 参数前后系统阻尼比情况, 可以看出, 优化后系统阻尼比有明显提升, 系统阻尼特性有所增强。

表 2 不同联络线传输功率下系统低频振荡模式  
Table 2 System low-frequency oscillation modes for different tie-line power

联络线 功率/MW	模 式	优化前			优化后			相关机组
		特征根	阻尼比/%	频率/Hz	特征根	阻尼比/%	频率/Hz	
350	1	-1.105 6±j7.386 8	14.80	1.175 6	-1.310 1±j7.351 9	17.54	1.170 1	G <sub>3</sub> ,G <sub>4</sub>
	2	-1.320 7±j6.251 2	20.67	0.994 9	-1.246 9±j6.389 8	19.15	1.017 0	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub>
	3	-0.931 6±j4.854 9	18.84	0.772 7	-0.974 1±j4.719 4	20.21	0.751 1	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub> ,G <sub>5</sub>
	4	-0.533 7±j3.887 3	13.60	0.618 7	-0.777 0±j3.858 2	19.74	0.614 1	G <sub>3</sub> ,G <sub>5</sub>
	5	-0.373 9±j0.766 5	43.84	0.122 0	-0.372 2±j0.763 8	43.60	0.121 6	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub> ,G <sub>3</sub> ,G <sub>4</sub> ,G <sub>5</sub> ,DFIG
300	1	-1.009 1±j7.421 1	13.47	1.181 1	-1.211 9±j7.478 2	16.00	1.205 7	G <sub>3</sub> ,G <sub>4</sub>
	2	-1.234 6±j6.211 4	19.49	0.988 6	-1.181 1±j6.306 1	18.41	1.021 1	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub>
	3	-0.876 9±j4.777 5	18.05	0.760 4	-0.921 6±j4.701 1	19.24	0.762 4	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub> ,G <sub>5</sub>
	4	-0.484 1±j3.887 8	12.36	0.618 8	-0.694 6±j3.900 9	17.53	0.630 6	G <sub>3</sub> ,G <sub>5</sub>
	5	-0.340 1±j0.720 8	42.67	0.114 7	-0.339 3±j0.716 2	42.81	0.126 1	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub> ,G <sub>3</sub> ,G <sub>4</sub> ,G <sub>5</sub> ,DFIG
250	1	-0.921 8±j7.447 8	12.28	1.185 4	-1.073 0±j7.583 7	14.01	1.057 4	G <sub>3</sub> ,G <sub>4</sub>
	2	-1.336 4±j6.150 7	21.23	0.978 9	-1.281 9±j6.220 6	20.18	0.944 6	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub>
	3	-0.875 3±j4.734 4	18.18	0.753 5	-0.892 1±j4.683 0	18.71	0.694 0	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub> ,G <sub>5</sub>
	4	-0.440 8±j3.878 3	11.29	0.617 2	-0.611 0±j3.928 5	15.37	0.561 7	G <sub>3</sub> ,G <sub>5</sub>
	5	-0.338 7±j0.712 5	42.93	0.113 4	-0.338 2±j0.707 7	43.12	0.133 6	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub> ,G <sub>3</sub> ,G <sub>4</sub> ,G <sub>5</sub> ,DFIG

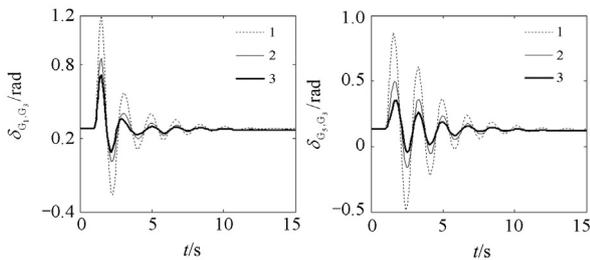
设置同 4.1 节的三相短路，图 11 给出在不同联络线功率下发电机 G<sub>1</sub> 与 G<sub>5</sub> 的相对功角曲线，图例含义同图 10。

由图 11 可知，随着联络线传输功率的降低，火力发电机组的相对功角曲线振荡幅度逐渐降低。从图 11(c)中可以看出，控制器参数优化后 G<sub>1</sub> 的相对功角曲线最大振幅由 0.6 rad 降为 0.4 rad，系统恢复稳定的时间也有所降低。这表明所设计的 STATCOM-POD 协调优化方法能够改善系统的阻尼特性，提高系统的稳定性，即使在联络线功率变化时，所设计

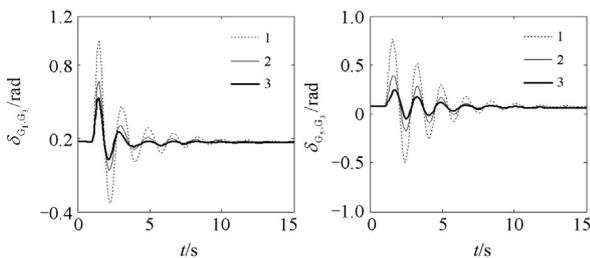


(c) 250 MW

图 11 不同联络线传输功率下系统三相短路响应曲线  
Fig. 11 System three-phase short circuit response curves for different tie-line power



(a) 350 MW



(b) 300 MW

算法优化的控制器参数也能够使机组相关曲线得到改善。

### 4.3 增加风光火打捆外送功率

在增加风光火打捆外送功率的情况下，本节研究参数优化后 STATCOM-POD 控制器对电力系统的影响。将风光火打捆外送功率提高至系统负荷总功率的 38.39%，其中火力发电机组出力增加 245 MW，光伏出力增加 50 MW，风电出力增加 40 MW，联络线功率保持 400 MW。表 3 显示了改变风光火打捆外送功率时系统的特征值，通过参数优化，模式 1 与模式 4 的阻尼比得到了改善，特别是模式 4，区域间振荡模式，阻尼比提升 108.20%。

增加风光火打捆系统对外输送功率后，系统三相短路响应曲线如图 12 所示，三相短路设置同 4.1 节，图例含义同图 10。

表 3 增加风光火打捆外送功率系统低频振荡模式

Table 3 System low-frequency oscillation modes when increasing the output of wind-PV-thermal-bundled power

振荡模式	特征根	阻尼比 %	频率/ Hz	相关机组	
原系统	1	-1.142 8±j7.273 4	15.52	1.157 6	G <sub>3</sub> ,G <sub>4</sub>
	2	-1.521 7±j5.954 8	24.76	0.947 7	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub>
	3	-0.556 7±j 4.705	11.75	0.748 4	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub> ,G <sub>5</sub>
	4	-0.310 1±j3.731 8	8.28	0.593 9	G <sub>3</sub> ,G <sub>5</sub>
	5	-0.294 1±j 0.914 2	30.62	0.145 5	G <sub>1</sub> —G <sub>5</sub> ,DFIG
优化前	1	-1.193 4±j7.356 5	16.01	1.170 8	G <sub>3</sub> ,G <sub>4</sub>
	2	-1.515 8±j5.936 6	24.74	0.944 8	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub>
	3	-0.644 6±j4.695 0	13.60	0.747 2	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub> ,G <sub>5</sub>
	4	-0.367 4±j4.000 3	9.15	0.636 7	G <sub>3</sub> ,G <sub>5</sub>
	5	-0.298 1±j0.898 6	31.49	0.143 0	G <sub>1</sub> —G <sub>5</sub> ,DFIG
优化后	1	-1.336 9±j7.189 9	18.28	1.144 3	G <sub>3</sub> ,G <sub>4</sub>
	2	-1.489 4±j5.954 2	24.27	0.947 6	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub>
	3	-0.561 3±j4.549 1	12.25	0.724 0	G <sub>1</sub> ,G <sub>2</sub> ,G <sub>5</sub>
	4	-0.782 6±j4.033 1	19.05	0.641 9	G <sub>3</sub> ,G <sub>5</sub>
	5	-0.290 8±j0.896 5	30.85	0.142 7	G <sub>1</sub> —G <sub>5</sub> ,DFIG

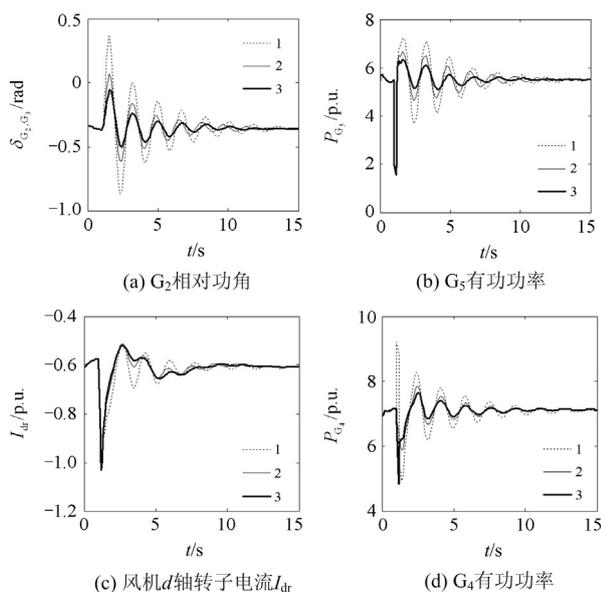


图 12 增加风光火打捆输送功率系统响应曲线

Fig. 12 System response curves when increasing the output of wind-PV-thermal-bundled power

如图 12 所示, 风光火打捆外送功率增加后, 系统加装 STATCOM-POD 控制器并采用优化参数后火力发电机  $G_2$  相对功角, 风机转子电流的  $d$  轴分量  $I_{dr}$ , 火力发电机  $G_4$  和  $G_5$  有功功率在三相短路下的振荡幅度均有不同程度的减弱。优化后系统在第 10 s 左右趋于稳定, 较原系统提前约 4 s, 缩短了系统恢复稳定的时间。这也表明所提出方法在本节工况

下仍然可以较好地抑制系统振荡和提高系统稳定性。

## 5 结语

为了研究并改善风光火打捆外送系统低频振荡特性, 本文提出了一种 STATCOM 附加 POD 协调优化控制策略, 基于 Matlab 构建了风光火打捆外送系统框架, 经交流输电线路送入 IEEE 四机二区域系统。采用遗传算法全局寻优 STATCOM-POD 参数, 并采用特征值分析和动态时域仿真验证了所提协调优化控制策略对风光火打捆外送系统低频振荡特性的改善作用。结果表明所提参数协调优化策略可以有效改善系统的阻尼特性和动态稳定性。主要结论如下:

1) 基于李雅普诺夫稳定法则构建计及系统所有振荡模式最小阻尼比的目标函数, 实现全局寻优 STATCOM-POD 参数, 且算法收敛性能较好。

2) STATCOM 附加 POD 协调优化控制策略, 实现了系统低频振荡模式最小阻尼比提高, 同时降低了系统动态响应振幅, 缩短了稳定时间。

3) STATCOM-POD 协调优化对风光火打捆外送系统区域间振荡改善效果较好, 为提高新能源消纳能力提供了新思路。

## 参考文献

- [1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [2] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 12(6): 58-64.  
WANG Can, ZHANG Yaxin. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(6): 58-64.
- [3] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.  
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC Projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [4] 吴萍, 陈昊, 赵兵, 等. 风光火打捆交直流混联外送系统交互影响及稳定性研究[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 1934-1942.

- WU Ping, CHEN Hao, ZHAO Bing, et al. Study on interaction and stability characteristics of bundled wind-PV-thermal power transmitted with AC/DC system[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1934-1942.
- [5] 张恒, 袁铁江, 车勇, 等. 兼顾新能源穿透率和风险的风光火打捆外送电源规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 71-76, 132.
- ZHANG Heng, YUAN Tiejia, CHE Yong, et al. Power supply planning for wind-photovoltaic-thermal bundled transmission considering both power penetration and risk of new energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 71-76, 132.
- [6] 王加强, 孙永辉, 翟苏巍, 等. 基于 Markov 理论的含风电电力系统随机建模及小干扰稳定性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 646-654.
- WANG Jiaqiang, SUN Yonghui, ZHAI Suwei, et al. Stochastic modeling and small signal stability analysis of wind power system based on Markov theory[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 646-654.
- [7] 艾松波, 唐欣, 王红亚. 光伏电站附加阻尼控制器及控制参数优化设计[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6): 21-27.
- AI Songbo, TANG Xin, WANG Hongya. Optimal design of additional damping controller and control parameters for photovoltaic power station[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6): 21-27.
- [8] DOWELL J, PINSON P. Very-short-term probabilistic wind power forecasts by sparse vector autoregression[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 763-770.
- [9] 秦心筱, 张昌华, 徐子豪, 等. 基于卷积神经网络的电力系统低频振荡主导模态特征定性辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 51-58.
- QIN Xinxiao, ZHANG Changhua, XU Zihao, et al. Research on qualitative identification of a low frequency oscillations dominant mode in power system based on a convolutional neural network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 51-58.
- [10] DONG W, LI S. Reliability sensitivity of wind power system considering correlation of forecast errors based on multivariate NSTPNT method[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 136-146.
- [11] 那广宇, 魏俊红, 王亮, 等. 基于 Gram-Charlier 级数的含风电电力系统静态电压稳定概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 115-122.
- NA Guangyu, WEI Junhong, WANG Liang, et al. Probabilistic evaluation of power system static voltage stability with wind power uncertainty based on the Gram-Charlier expansion[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 115-122.
- [12] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
- LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [13] KAHOUALI O, JEBALI M, ALSHAMMARI B, et al. PSS design for damping low-frequency oscillations in a multi-machine power system with penetration of renewable power generations[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(1): 116-127.
- [14] BIAN X Y, GENG Y, LO K L, et al. Coordination of PSSs and SVC damping controller to improve probabilistic small-signal stability of power system with wind farm integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2371-2382.
- [15] 和萍, 陈婕, 耿斯涵, 等. FACTS 装置对含风电互联系统低频振荡特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 86-95.
- HE Ping, CHEN Jie, GENG Sihan, et al. Analysis of FACTS device on low-frequency oscillation characteristics of a power system with wind farm integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 86-95.
- [16] 李婷, 胥威汀, 刘向龙, 等. 含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 177-187.
- LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 177-187.
- [17] 吴小丹, 王鹏飞, 曹冬明. 星形链式 STATCOM 直流侧输入阻抗及交直流功率耦合关系分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 70-76.
- WU Xiaodan, WANG Pengfei, CAO Dongming. Analysis on DC-side input impedance and AC/DC power coupling relationships of star cascaded STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 70-76.
- [18] 熊连松, 卓放, 刘小康, 等. 静止同步补偿器抑制电网功率振荡的机理研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(12): 112-120.
- XIONG Liansong, ZHUO Fang, LIU Xiaokang. Analysis on mechanism of power oscillation mitigation by STATCOM[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(12): 112-120.
- [19] WANG L, CHANG C H, KUN B L. Stability improvement of a two-area power system connected with

- an integrated onshore and offshore wind farm using a STATCOM[C] // 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, October 2-6, 2016, Portland, USA: 1-9.
- [20] 曹建春, 项祖涛, 燕翠, 等. 抑制双馈风电场次同步谐振的 STATCOM 研究[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 895-902.  
CAO Jianchun, XIANG Zutao, YAN Hui, et al. Research on mitigating DFIG wind farm SSR with STATCOM[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 895-902.
- [21] 刘引弟, 刘会强, 邢华栋, 等. STATCOM 抑制低频振荡及稳定电压在风电场中的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 18-25.  
LIU Yindi, LIU Huiqiang, XING Huadong, et al. Study on the application of suppressing low frequency oscillation and stabilizing voltage by STATCOM in wind farm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 18-25.
- [22] 和萍. 大规模风电接入对电力系统稳定性影响及控制措施研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
HE Ping. Investigations on impacts and control strategies of power system stability with wind power integration[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [23] SHLOOTWEG J G, KLING W L. The impact of large scale wind power generation on power system oscillations[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 67(1): 9-20.
- [24] 王阔. 风光火打捆外送系统暂态稳定性及控制策略研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.  
WANG Kuo. Study on the transient stability and control strategy for wind-thermal-bundled transmission system[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [25] HE P, WEN F S, LEDWICH G. Investigation of the effects of various types of wind turbine generators on power-system stability[J]. Journal of Energy Engineering, 2015, 141(3): 1-10.
- [26] HE P, WEN F S, LEDWICH G, et al. An investigation on interarea mode oscillations of interconnected power systems with integrated wind farms[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 78(2): 148-157.
- [27] HAQUE M H. Improvement of first swing stability limit by utilizing full benefit of shunt FACTS devices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1894-1902.
- [28] RAHIM A, AL-BAIYAT S A, AL-MAGHRABI H M. Robust damping controller design for a static compensator[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(4): 491-496.
- [29] SURINKAEW T, NGAMROO I. Coordinated robust control of DFIG wind turbine and PSS for stabilization of power oscillations considering system uncertainties[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 823-833.
- [30] KUNDER P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994.

收稿日期: 2021-03-02; 修回日期: 2021-07-27

作者简介:

和萍(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制、风电并网; E-mail: hplkz@126.com

方祺元(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制。E-mail: 1394557706@qq.com

(编辑 许威)