

基于储能型双馈调相机的多通道附加阻尼控制策略

吕镇琿, 郑文涛, 郭祥源, 李欢, 褚晓东, 牟倩颖

(山东大学电气工程学院, 山东省 济南市 250061)

Research on Multi-channel Supplementary Damping Control Strategy Based on Energy Storage Doubly-fed Condenser

LÜ Zhenhui, ZHENG Wentao, GUO Xiangyuan, LI Huan, CHU Xiaodong, MOU Qianying
(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China)

ABSTRACT: Sub/super-synchronous oscillations in renewable energy stations pose significant threats to the secure and stable operation of power systems. While synchronous condensers (SCs) can partially suppress such oscillations, a multi-channel supplementary damping control strategy based on energy storage doubly-fed condenser (ESDFC) is proposed to further enhance oscillation suppression capability. First, a supplementary damping controller (SDC) is designed to target oscillations within specific frequency bands. The current signal at the point of common coupling (PCC) is modulated by the SDC and then fed into the rotor-side control system. This modulation adjusts the reactive power output of the SC, effectively suppressing system oscillations. Second, the controller is divided into multiple channels based on phase compensation deviations introduced by phase-shifting blocks. Each channel is dedicated to suppressing oscillations within a predefined frequency band. Third, the Prony algorithm is employed to extract power oscillation signals for damping ratio calculation, enabling quantitative evaluation of the multi-channel SDC's oscillation suppression performance. Finally, simulations are conducted on both a single-machine system and a renewable energy station system. The results demonstrate that the proposed multi-channel supplementary damping control strategy significantly enhances the ESDFCs to suppress sub/super-synchronous oscillations. This strategy improves the small-signal stability of renewable energy stations, thereby supporting the long-term sustainable development of renewable power generation.

KEY WORDS: energy storage doubly-fed condenser; multi-channel supplementary damping control; sub/super-synchronous oscillation; renewable energy station

基金项目: 国家重点研发计划项目: “高惯量储能型同步调相机关键技术及装备(2023YFB2406800)”。

Project Supported by National Key Research & Development Program of China: “Key Technology and Equipment for High Inertia Energy Storage Synchronous Condenser”(2023YFB2406800).

摘要: 新能源场站的次/超同步振荡给电力系统的安全稳定运行造成威胁, 调相机可以在一定程度上抑制次/超同步振荡。为进一步发挥调相机抑制振荡的能力, 提出一种基于储能型双馈调相机的多通道附加阻尼控制策略。首先, 设计针对特定频段振荡的附加阻尼控制器, 公共耦合点(point of common coupling, PCC)的电流信号经过附加阻尼控制器调制后被输出到机侧控制系统, 调节调相机的无功输出实现对系统振荡的有效抑制; 其次, 根据移相环节的相位补偿偏差将控制器划分为多个通道, 每个通道针对特定频段进行振荡抑制; 然后, 使用 Prony 算法提取功率振荡信号进行阻尼比计算, 评估多通道附加阻尼控制器的振荡抑制效果; 最后, 在单机系统及新能源场站系统中进行仿真, 结果表明多通道附加阻尼控制策略能够显著提高储能型双馈调相机对次/超同步振荡的抑制能力。该策略提高了新能源场站的小干扰稳定性, 有利于新能源发电的长期可持续发展。

关键词: 储能型双馈调相机; 多通道附加阻尼控制; 次/超同步振荡; 新能源场站

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0699

0 引言

在“双碳”目标的大背景下, 我国的新能源发电的装机容量和发电量不断增长, 电力系统呈现出高比例可再生能源、高比例电力电子设备的“双高”态势。大量的新能源发电并网, 改变了电力系统的动态特性。

与传统的同步发电机为主的电力系统相比, “双高”电力系统具有以下特点^[1]: 1) 系统动态行为主要受电力电子器件控制策略支配; 2) 呈现宽频域动态响应特性; 3) 系统等效转动惯量显著降低; 4) 对外界扰动抵御能力减弱; 5) 设备过载耐受裕度减小; 6) 故障期间短路电流幅值受限。在此背景下, 无功补偿对电力系统的安全稳定运行就显得尤为重要。

目前主流无功补偿装置有静止无功补偿器

(static var compensator, SVC)、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)和同步调相机^[2]。电力电子型无功补偿装置(如 SVC、STATCOM)虽然响应速度快、控制灵活,但其可靠性相对较低^[3-5]。同步调相机相较于电力电子无功补偿装置,在故障工况下会自主响应系统的无功需求,提供瞬时无功支撑,并具备更强的短时过载能力^[6]。

赵天骐等^[7]针对同步调相机提出了一种稳态-暂态无功协同优化控制方法,通过预想故障集协调风电机组、电容器与分布式调相机的运行,从而有效提升了调相机的暂态支撑能力,增强了电网稳定性。周煜等^[8]提出了一种基于复合指标的分布式调相机优化配置方法,以最小配置容量的调相机来满足新能源场站短路比需求。林俐等^[9]针对新能源基地短路比提升需求,提出了基于短路比约束的构网型场站与调相机协同优化配置方案。索之闻等^[10]提出一种计及边际贡献的新能源场站分布式调相机投资收益评估方法。杨浩等^[11]提出一种计及短路比提升和暂态过电压抑制的调相机优化配置策略。张建坡等^[12]分析调相机接入对电网参数及强度的影响,研究基于电气参数加权占比的新能源场站分布式调相机容量配置方案,利用机电暂态仿真,从经济型和有效性各个方面验证调相机容量配置方案正确性。这些研究主要聚焦于调相机本体优化,包括无功控制、频率特性、协调配置及经济效益等方面,尚未通过直接控制调相机来提升系统稳定性和抑制振荡。

“双高”电力系统中,发电设备、输电网络与电力负荷间的动态交互可能诱发数赫兹至数千赫兹范围内的不稳定振荡,即宽频振荡问题^[13]。文献[14]采用一种基于阻尼转矩分析的阻尼控制器以抑制电容串联补偿的双馈异步发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)次同步振荡问题。刘纯等^[15]基于频域小信号阻抗分析法,构建了新能源同步发电机的宽频阻抗模型,仿真结果表明该拓扑结构具有抑制宽频振荡的良好效果。文献[16]采用遗传算法协调优化控制器参数,设计了一种应用于DFIG并网高阶非线性系统的附加阻尼控制器以改善不同频段振荡模式。文献[17]设计了一种基于相量测量单元的双馈风电机组附加阻尼控制器,通过对主振荡分量进行处理,实现了对区域间振荡模式的有效抑制。施星宇等^[18]开发了一种数据驱动的鲁棒附加阻尼控制器,通过双馈风机无功调制增强系统区间振荡阻尼,显著提高了控制适应性和鲁棒性

能。文献[19]针对并联虚拟同步发电机系统由于大惯量引起的有功功率振荡问题,提出了一种基于加速度控制的附加阻尼策略。李生虎等^[20]提出一种基于DFIG的多通道附加阻尼控制器用于增加系统多低频振荡模式的阻尼,通过传递函数灵敏度整定控制参数,有效增强了系统多低频振荡模式的阻尼特性。此外,文献[21]提出了一种用于风电场串补系统的网侧次同步阻尼控制器,以解决因串补引发的不稳定次同步控制交互问题。这些研究主要集中在宽频振荡建模、对双馈风机施加控制或其他方式来抑制振荡,没有直接在调相机上施加控制来抑制宽频振荡。

因此,可以考虑在调相机上施加控制以抑制宽频振荡。常规同步调相机在电网无功补偿与稳定支撑方面展现出显著的综合优势。其核心优势在于具备强大的无功补偿能力,能够实现双向全额无功功率输出,非常适合于大规模电网的集中式无功支撑需求。在可靠性方面,得益于成熟的技术架构与无电力电子器件的设计,它有效规避了器件失效风险,保障了在高温、高湿等恶劣环境下的长期稳定运行。作为旋转设备,调相机天然具备优异的暂态支撑能力,系统故障时可利用其旋转动能释放,有效抑制电压骤降。尤为关键的是,具备独立励磁系统的调相机可在电网全失电工况下作为“旋转备用”,能够通过调速器调节原动机功率,为电网频率恢复提供有力支持。常规同步调相机的核心功能是动态无功补偿,但缺乏有功功率和惯量支撑能力,无法有效响应频率波动或提供系统惯性,难以应对电压、频率失稳以及宽频振荡风险。

储能型双馈调相机(energy storage doubly-fed condenser, ESDFC)基于交流励磁技术,可通过励磁控制使高惯量转子大范围变速以提升调相机的惯量和频率支撑能力,在系统故障时为系统备用能量提供一定的反应时间,降低系统大规模故障的可能性。同时该调相机仍兼具直流励磁同步调相机的强电压支撑、高过载能力等优点,可为电网提供动态无功支撑。ESDFC在理论和应用上展现出巨大潜力,目前仍处于起步阶段,针对ESDFC的研究存在一定空白。因此,考虑在ESDFC上施加控制来抑制新能源场站的次/超同步振荡,提高系统的稳定性。

针对上述问题,本文提出了基于ESDFC的多通道附加阻尼控制,将附加阻尼控制应用到新对象——储能型双馈调相机上。首先,介绍ESDFC并网系统及控制模块的拓扑结构;然后,针对ESDFC

结构提出多通道附加阻尼控制模型,通过通道的划分对不同频段的振荡进行有效抑制;最后,在单机系统和新能源场站分别进行仿真实验,仿真结果验证了所提附加阻尼控制策略的有效性。本文所提出的多通道附加阻尼控制策略能够有效抑制新能源场站的次/超同步振荡,从而提升系统的稳定性。该控制策略可以增强新能源场站抗干扰能力,对于保障高比例可再生能源并网背景下的电力系统稳定运行具有重要意义。

1 ESDFC 及其控制结构

ESDFC 是一种基于双馈感应电机(doubly-fed induction machine, DFIM)的交流励磁调相机,整体由双馈感应电机、高惯量飞轮、机侧变流器、网侧变流器以及直流侧电容构成。飞轮与 DFIM 转子同轴相连,增大了机组机械转动惯量以及储能容量,在运行过程中可实现能量的动态存储与释放。

ESDFC 的结构如图 1 所示。

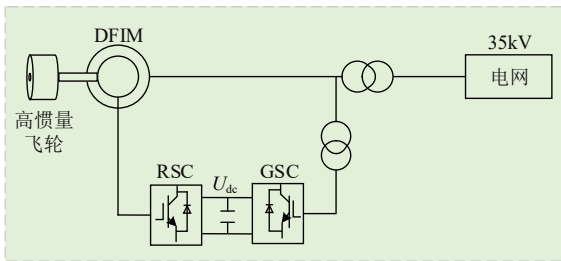


图 1 ESDFC 的结构
Fig. 1 Structure of ESDFC

不考虑频率变化和温度对绕组电阻的影响,得到 ESDFC 同步旋转坐标系下的电压方程和磁链方程。电压方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_s \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程如式(2)所示:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: u 、 i 为电压、电流; R 、 Ψ 为电阻、磁链; 下标 s 、 r 为定子、转子分量; 下标 d 、 q 为同步旋转坐标系下 d 、 q 轴分量; p 为微分算子; L_m 为定转子互感; L_s 为定子侧电感; L_r 为转子侧电感; ω_s 为同步角速度; ω_r 为转子角速度。

ESDFC 定子侧功率和电磁转矩表达式为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(u_{sd}i_{sd} + u_{sq}i_{sq}) \\ Q_s = \frac{3}{2}(u_{sq}i_{sd} - u_{sd}i_{sq}) \\ T_e = \frac{3L_m}{2L_s} n_p (\psi_{sq}i_{rd} - \psi_{sd}i_{rq}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_s 、 Q_s 分别为定子侧有功、无功功率; T_e 为电磁转矩。

ESDFC 并网系统控制模块主要由网侧变流器控制器和机侧变流器控制器组成。

ESDFC 的网侧变流器(grid-side converter, GSC)控制器由电压外环、电流内环和调制输出环节构成,引入电流反馈量来实现解耦控制。同时 GSC 又引入电网扰动电压项进行前馈补偿,从而实现 d 、 q 轴电流的解耦控制,有效提高了系统的动态控制性能, GSC 控制结构如图 2 所示。其中, U_{dcref} 为直流母线参考电压, U_{dc} 为直流母线电压, i_{gd} 、 i_{gq} 分别为网侧 d 、 q 轴电流, i_{gdref} 为网侧 d 轴参考电流。

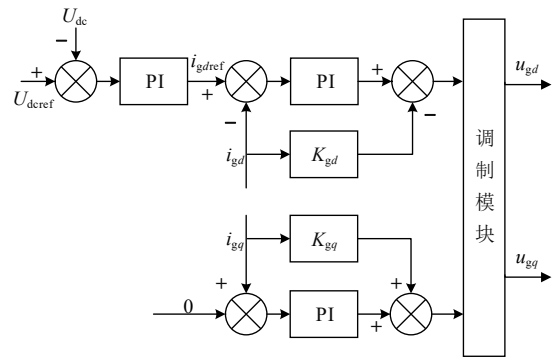


图 2 网侧变流器控制器结构
Fig. 2 Structure of the grid-side converter controller

经调制输出网侧电压耦合分量如下式:

$$u_{gd} = u_{sd} + \omega_s L_g i_{gqref} - u_{gd}^* - R_g i_{gdref} \quad (4)$$

$$u_{gq} = u_{sq} - \omega_s L_g i_{gdref} - u_{gq}^* - R_g i_{gqref} \quad (5)$$

式中: u_{gd} 、 u_{gq} 分别为电网侧 d 轴电压、 q 轴电压, $\omega_s L_g i_{gqref}$ 和 $\omega_s L_g i_{gdref}$ 为解耦分量; R_g 为网侧电阻; L_g 为网侧电感。

ESDFC 的机侧变流器(rotor-side converter, RSC)控制模块采取定子电压定向矢量控制,在传统功率外环控制的基础上提供功率参考项,即转速外环。转速外环通过 ESDFC 飞轮的参考转速和实际转速构成闭环控制器,闭环控制器输出功率控制参考指令。同时将阻尼控制信号附加于转子 q 轴参考电压。RSC 控制结构如图 3 所示。其中, ω_{rref} 为参考转速, ω_r 为实际转速; P_{ref} 、 Q_{ref} 为有功、无功参考功率; P_{meas} 、 Q_{meas} 为有功、无功实际功率; i_{rdref} 、 i_{rqref} 为转子 d 、 q 轴参考电流。

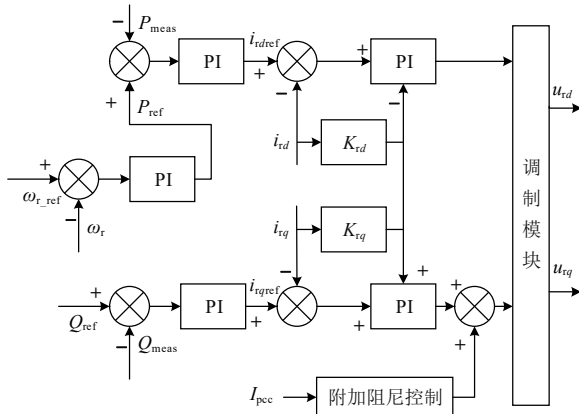


图3 机侧变流器控制器结构

Fig. 3 Structure of the rotor-side converter controller

经调制输出转子侧电压耦合分量如下：

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_s \left(-\frac{L_m}{\omega_1 L_s} U_s + \sigma L_r i_{rq} \right) \quad (6)$$

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s \sigma L_r i_{rd} \quad (7)$$

式中： σ 为发电机漏磁系数。

2 多通道附加阻尼控制器设计

2.1 多通道附加阻尼控制器设计思路

选取能够反映振荡模态的信号作为控制系统的输入信号，经过 dq 变换、滤波环节、相位补偿环节和阻尼调节模块调制生成控制信号，并将其附加于 ESDFC 的机侧变流器控制系统来调节机侧电压大小以抑制振荡。由于 d 轴控制通道可能与高惯量飞轮转速产生相互作用，影响 ESDFC 的飞轮转速特性；而 q 轴控制通道为无功通道，无功调节不易影响 ESDFC 的固有特性，因此选取无功通道作为附加阻尼控制器的控制通道。在单通道附加阻尼控制的基础上进一步拓展其控制维度与作用范围，构建能够适应多频段振荡抑制需求的多通道附加阻尼控制器。

2.2 单通道附加阻尼控制器结构

针对特定振荡模态设计附加阻尼控制器以抑制该振荡模态，图4为针对单一振荡模态的控制器结构。其中， i_{35kV} 为PCC电流信号， $H(s)$ 为滤波器传递函数， u_c 为阻尼控制器输出信号。

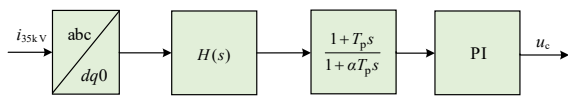


图4 单通道附加阻尼控制器结构

Fig. 4 Single-channel supplementary damping controller structure

假设系统存在镜像耦合的次/超同步振荡，频率分别为 ω_1 和 ω_2 ，基频为 ω_0 ，此时控制器输入信号为 PCC 电流信号，当电流信号经过坐标变换后，原

本频率为 ω_1 和 ω_2 的次同步/超同步振荡分量，映射到 dq 坐标系下转换为 $(\omega_0 - \omega_1)$ 、 $(\omega_2 - \omega_0)$ 的振荡分量。

振荡分量转换完成后使用带通滤波器去除与该频段不相关的分量并提取振荡分量信号，滤波器传递函数为

$$H(s) = \frac{(\omega_s / Q)s}{s^2 + (\omega_s / Q)s + \omega_0^2} \quad (8)$$

式中： ω_s 为中心频率； Q 为品质因数，决定带通宽度。

带通滤波器将振荡分量信号提取完毕后，使用移相环节调整控制信号的相位，使其与目标振荡模态的相位匹配，从而有效抑制振荡。移相增益模块传递函数为

$$H_c(s) = \frac{1 + T_p s}{1 + \alpha T_p s} \quad (9)$$

$$T_p = \frac{1}{\omega_x \sqrt{\alpha}} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \quad (11)$$

式中： T_p 为时间常数，决定了移相的幅度，其大小取决于目标频率 ω_x 和移相幅度角 α ； α 的值取决于目标的相位补偿角 θ 。

通过调节参数 α 和 T_p ，移相环节可以对目标频段信号进行特定相位偏移，用于振荡抑制。相位补偿后的信号通过 PI 阻尼增益模块，生成附加阻尼控制信号。

2.3 多通道附加阻尼控制器的结构

单通道附加阻尼控制器一般只针对特定频段的振荡，对自身频段范围外的振荡抑制效果差，甚至无法抑制。因此须设计多通道附加阻尼控制器以应对多频段振荡，不同通道可根据移相环节提供的相位补偿偏差来划分。

多通道附加阻尼控制器的结构如图5所示。

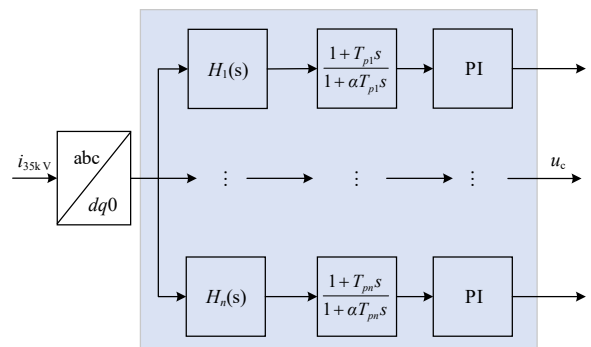


图5 多通道附加阻尼控制器结构

Fig. 5 Multi-channel supplementary damping controller structure

首先，对采集到的电流信号进行坐标变换，得

到 dq 坐标系下的电流信号, 并以该信号作为输入信号。在振荡分量转换完成后, 不同通道的带通滤波器提取振荡分量, 滤波器传递函数为

$$H_n(s) = \frac{\omega_n s}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q_n} s + \omega_n^2} \quad (12)$$

式中: ω_n 为通道 n 的带通中心频率; Q_n 为通道 n 的品质因数, 决定带通宽度。

在振荡分量提取完毕后, 通过移相环节, 完成相位补偿。多通道移相环节传递函数为

$$H_{cn}(s) = \frac{1 + T_{pn}s}{1 + \alpha_n T_{pn}s} \quad (13)$$

式中: α_n 、 T_{pn} 为根据移相角度设计的补偿参数; n 为所取振荡模态的通道编号, 不同模态经过对应的补偿环节完成相位补偿。

移相环节输出的信号通过阻尼增益模块, 最终生成附加阻尼控制信号。

ESDFC 的多通道附加阻尼控制抑制次同步/超同步振荡的整体策略如图 6 所示。

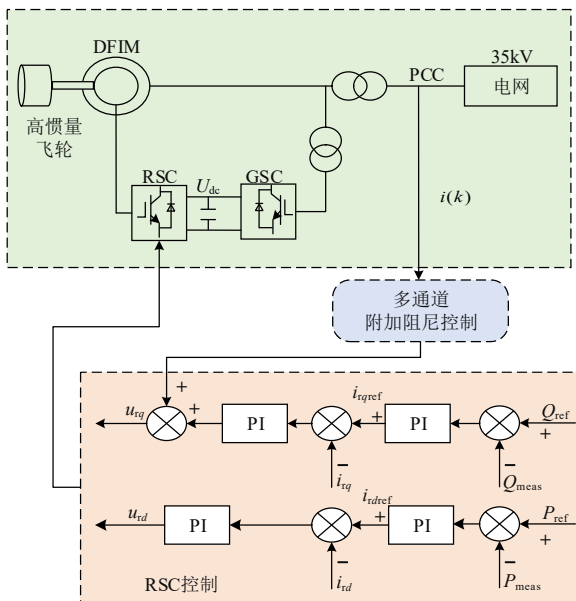


图 6 ESDFC 的多通道附加阻尼控制整体控制策略
Fig. 6 Overall control strategy for multi-channel supplementary damping control of ESDFC

2.4 多通道附加阻尼控制的通道划分

以目标频率 $\omega_x = 8 \times 2\pi \text{ rad/s}$ 为例进行相位补偿, 此时移相环节传递函数的伯德图如图 7 所示。

由伯德图 7 可见, 当 $\omega_x = 8 \times 2\pi \text{ rad/s}$, 设定相位补偿角度 $\theta = -15^\circ$ 时, 移相环节能在该频率下实现准确的相位补偿, 但其他振荡频段的补偿效果会偏离目标角度。为改善频率依赖性导致非目标频段的

相位补偿不足, 需要将控制系统划分为多个通道, 每个通道针对一个频段, 确保在其对应的频段内能实现预设的相位补偿。

将镜像耦合的 1~100Hz 范围内的次/超同步振荡分量映射到 dq 坐标系下, 转换为 1~50Hz 范围内的振荡分量后采用上述多通道架构, 可以减小因振荡频段不同而引起的补偿偏差, 从而实现对 1~100Hz 范围内次/超同步振荡的抑制。

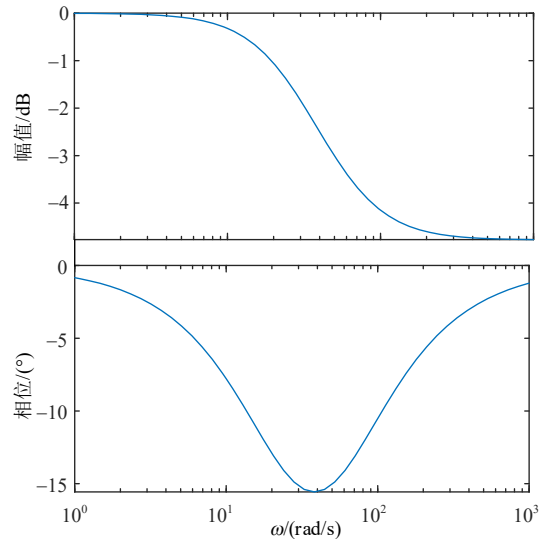


图 7 移相环节伯德图

Fig. 7 Bode diagram of the phase-shifting block

移相环节的频率响应为

$$H_c(j\omega) = \frac{1 + jT_p\omega}{1 + j\alpha T_p\omega} \quad (14)$$

根据频率响应可以得到分子与分母的相位差, 即相位补偿角:

$$\omega = \arctan(T_p\omega) - \arctan(\alpha T_p\omega) \quad (15)$$

抑制目标频率振荡时需要相位补偿环节提供合适的移相角度。以上述伯德图为例, 根据移相环节在不同频段所提供的相位补偿角度的大小来划分多通道附加阻尼控制器的不同控制通道。设定目标频率所需的相位补偿角度为 θ , 相位补偿角度允许偏差为 $\pm 5\%$, 即

$$0.95\theta \leq \phi(\omega) \leq 1.05\theta \quad (16)$$

通过数值求解满足条件的频率范围 $\omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ 。该范围即移相环节所能够提供有效相位补偿角度的频率范围, 在此范围内的振荡信号都能够获得有效的相位补偿角度。

根据式(12)~(16)的约束条件可以划分出不同的频段, 不同频段对应多通道附加阻尼控制器的不同通道, 通道划分结果如表 1 所示, 各通道参数如表 2 所示。

表 1 通道划分结果

Table 1 Channel division results

通道	通道划分/Hz
1	1~3
2	3~6
3	6~13
4	13~32
5	32~50

表 2 各通道滤波移相参数

Table 2 Filter and phase-shifting parameters for each channel

通道	ω_n	Q_n	T_{pm}	α_n
1	1.73	0.138	0.072	1.733
2	4.24	0.225	0.032	1.733
3	8.83	0.201	0.015	1.731
4	20.39	0.171	0.006	1.729
5	40.00	0.354	0.004	1.730

2.5 多通道附加阻尼控制器效果分析

为评价多通道附加阻尼控制器对系统稳定性的提升效果，采取 Prony 算法求解投入多通道附加阻尼控制器前后系统阻尼比 ζ_k ，并以阻尼比作为评价多通道附加阻尼控制器控制效果的指标。

Prony 算法的主要步骤如下：

首先构造信号的自相关矩阵 R 以提高信噪比并增强模态辨识能力：

$$R = \begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \dots & r(p) \\ r(1) & r(0) & \dots & r(p-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(p) & r(p-1) & \dots & r(0) \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中： $r(k) = \sum_{n=0}^{N-k-1} x(n)x(n+k)$ 为信号的自相关函数。对 R 进行奇异值分解，设定阈值 $S_{ii}/S_{11} < 10^{-5}$ 确定有效阶数以抑制噪声干扰并保留主要模态成分。

对奇异值分解的结果构造 Prony 特征多项式：

$$P(z) = z^p + a_1 z^{p-1} + \dots + a_p \quad (18)$$

求解特征多项式的解 $\{z_k\}_{k=1}^p$ 并将解转换为频率和衰减因子：

$$f_k = \frac{\arg(z_k)}{2\pi\Delta t}, \quad \alpha_k = \frac{\ln|z_k|}{\Delta t} \quad (19)$$

最后利用频率和衰减因子计算阻尼比 ζ_k 作为评价多通道附加阻尼控制器的性能指标。

3 算例分析

在 Simulink 上分别进行单机无穷大系统和含 ESDFC 的新能源场站系统算例仿真。

3.1 单机无穷大系统仿真验证

单机无穷大系统拓扑如图 8 所示。单机无穷大系统中 ESDFC 额定容量为 11MVA，电网等效电阻 R_g 为 0.1Ω，电网等效电感 L_g 为 5.8mH。ESDFC 经

10.5/35kV 升压变压器接入电网。

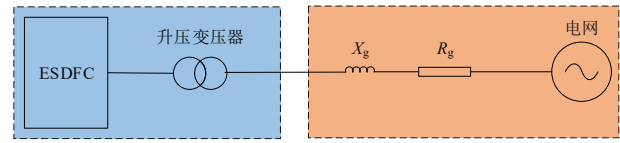


图 8 单机系统接入无穷大电网系统拓扑

Fig. 8 System topology diagram of single machine connected to infinite-bus power grid

单机无穷大系统中，可将外部系统视为等效电压源串联等效阻抗 Z_{eq} 。通过增大线路的 R_g 、 L_g 使得 Z_{eq} 变大，进而使得系统强度变弱，从而激发振荡。激发振荡后投入多通道附加阻尼控制器，观察系统运行情况并采集数据，计算投入多通道附加阻尼控制器前后的阻尼比提升大小。

为验证多通道附加阻尼控制器的有效性，针对单机算例(工况 1)设置如下：系统初始运行于稳态，在 $t=2s$ 时线路阻抗由 Z_{eq} 增大为 $150Z_{eq}$ ，从而激发振荡， $t=5s$ 时投入多通道附加阻尼控制器。

图 9 表示施加控制前后单机系统并网点有功功率变化。在无附加阻尼控制器时，系统振荡将持续；引入多通道附加阻尼控制器后，振荡被有效抑制，系统能快速回到稳定运行状态。

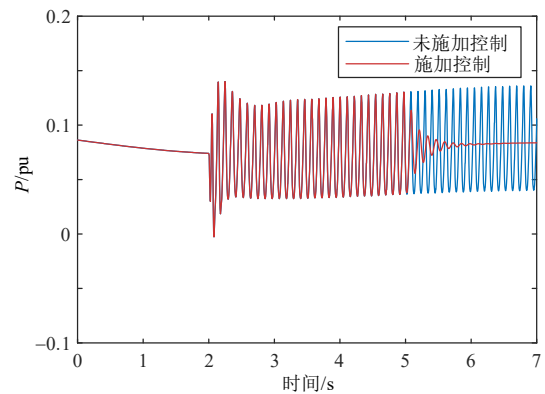


图 9 工况 1 投入控制器前后并网点有功功率

Fig. 9 Active power at the point of common coupling before and after activating controller under condition 1

3.2 含 ESDFC 的新能源场站系统仿真验证

新能源场站系统由 1 台 ESDFC 和风电场构成，如图 10 所示。

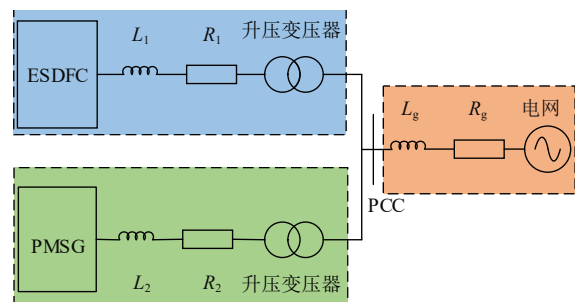


图 10 新能源场站系统拓扑

Fig. 10 Renewable energy station system topology diagram

风电场含 30 台永磁直驱同步风机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)。每台 PMSG 额定容量为 1.5MVA, ESDFC 额定容量为 11MVA。电网等效电阻 R_g 为 3.0625Ω , 电网等效电感 L_g 为 $0.039H$ 。ESDFC 接入电网系统的等效电阻 R_1 为 $1.6m\Omega$, 等效电感 L_1 为 $160\mu H$ 。永磁直驱风机系统接入电网系统的等效电阻 R_2 为 $1.92m\Omega$, 等效电感 L_2 为 $4.59\mu H$ 。ESDFC 和 PMSG 分别经 $10.5/35kV$ 升压变压器连接到 $35kV$ 母线。

场站算例中, 风电场在运行过程中易受系统故障的影响从而引发振荡。因此, 通过改变系统中风电场的控制参数来激发振荡。激发振荡后投入多通道附加阻尼控制器, 观察系统运行情况并采集数据, 计算投入多通道附加阻尼控制器前后的阻尼比提升大小, 通过阻尼比是否得到提升来衡量系统稳定性。

3.2.1 工况 2 仿真验证

本工况设置如下: 系统初始运行于稳态, 在 $t=1s$ 时 PMSG 锁相环 PI 环节比例系数突变激发振荡, 在 $t=3s$ 时投入多通道附加阻尼控制器。

图 11 表示工况 2 施加控制前后并网点有功功率变化。未施加附加阻尼控制器时, 系统将维持先前等幅振荡; 投入多通道附加阻尼控制器后, 振荡得到有效抑制, 系统回到稳定运行状态。

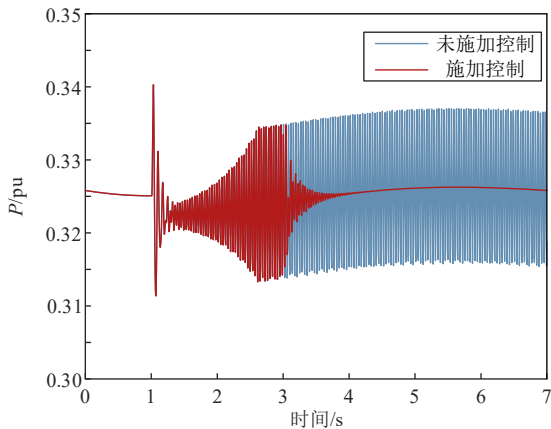


图 11 工况 2 投入控制器前后并网点有功功率

Fig. 11 Active power at the point of common coupling before and after activating controller under condition 2

3.2.2 工况 3 仿真验证

本工况设置如下: 系统初始运行于稳态, 在 $t=2s$ 时 PMSG 锁相环 PI 环节比例系数突变激发振荡, 在 $t=4s$ 时投入多通道附加阻尼控制器。

图 12 表示工况 3 施加控制器前后并网点有功功率变化。在施加多通道附加阻尼控制器后, 等幅振荡得到有效抑制, 系统回到稳定运行状态。

3.3 通道划分必要性验证与阻尼比计算

为验证通道划分的必要性, 将通道 4 和通道 5

阻尼控制分别施加于工况 3(7/93Hz)的次/超同步振荡, 并观察振荡抑制情况, 如图 13 所示。

图 13(a)为通道 4(13~32Hz)的附加阻尼控制施加于振荡工况 3 (43Hz), 图 13(b)为通道 5(32~50Hz)的附加阻尼控制施加于振荡工况 3(43Hz)。通道 4(13~32Hz)无法有效抑制工况 3(43Hz)对应的振荡, 但如图 11 所示通道 4(13~32Hz)可以有效抑制工况 2(27Hz)对应的振荡; 通道 5(32~50Hz)对于工况 3(43Hz)的振荡有良好的抑制效果, 由此说明单一通道抑制振荡的频率范围是有限的。多通道附加阻尼控制器可以有效抑制更宽频段的振荡, 由此说明多通道附加阻尼控制器的必要性和有效性。

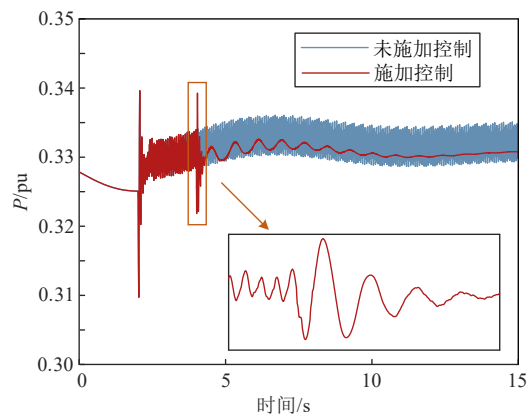
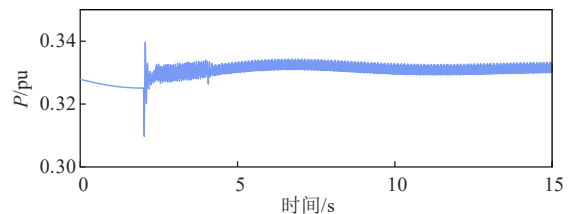
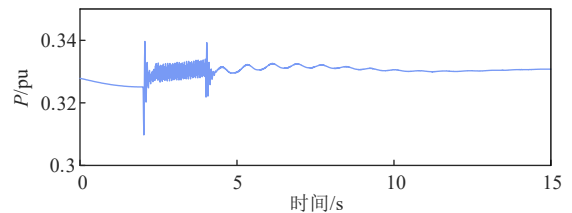


图 12 工况 3 投入控制器前后并网点有功功率

Fig. 12 Active power at the point of common coupling before and after activating controller under condition 3



(a) 通道 4 施加于振荡工况 3



(b) 通道 5 施加于振荡工况 3

图 13 不同通道抑制振荡效果对比

Fig. 13 Comparison of oscillation suppression effect of different channels

采集各工况投入多通道附加阻尼控制器前后并网点有功功率数据进行 Prony 计算, 计算结果如表 3 所示。

计算结果表明, 多通道附加阻尼控制器投入后, 系统阻尼比均得到提升, 系统稳定性得到提高, 多通道附加阻尼控制器实现了预期效果。

表3 各工况施加控制前后阻尼比

Table 3 Damping ratio before and after applying control to each condition

工况	次/超同步	dq 坐标系下	施加控制前	施加控制后	阻尼比
	振荡频率/Hz	振荡频率/Hz	阻尼比/%	阻尼比/%	提升/%
1	41/59	9	0.5	11.98	11.48
2	23/77	27	0.1	4.98	4.88
3	7/93	43	0.27	4.19	3.92

4 结论

本文提出一种基于储能型双馈调相机的用于抑制新能源场站的次/超同步振荡的多通道附加阻尼控制策略。所提控制器集成带通滤波模块、移相增益模块和阻尼增益模块，可以有效抑制系统的次/超同步振荡，提升系统稳定性和鲁棒性。

具体结论如下：

1) 建立 ESDFC 的控制系统拓扑结构，相较传统阻尼控制结构，多通道附加阻尼控制器应用于含 ESDFC 的系统，可以有效抑制更宽频段的振荡，提升系统稳定性和鲁棒性。

2) 单机系统和新能源场站系统的仿真结果表明多通道附加阻尼控制器投入后，系统阻尼比有效提升，对于次/超同步振荡抑制效果明显。

参考文献

- [1] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-474.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474(in Chinese).
- [2] HADAVI S, MANSOUR M Z, BAHRANI B. Optimal allocation and sizing of synchronous condensers in weak grids with increased penetration of wind and solar farms[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2021, 11(1): 199-209.
- [3] 黄碧月, 陈雅皓, 孙海顺, 等. 考虑静止无功补偿器的直驱风电并网系统次同步振荡[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 446-456.
HUANG Biyue, CHEN Yahao, SUN Haishun, et al. Sub-synchronous oscillation in wind farm integrated power system considering static var compensator[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 446-456(in Chinese).
- [4] 金一丁, 于钊, 李明节, 等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2095-2102.
JIN Yiding, Yu Zhao, Li Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2095-2102(in Chinese).
- [5] 康勇, 林新春, 潘辰, 等. 弱电网下采用 SVC 与 SVG 补偿后新能源并网变换器的功率传输特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2115-2124.
KANG Yong, LIN Xinchun, PAN Chen, et al. Analysis of power transmission characteristics of renewable energy grid-connected

- converter considering SVC and SVG compensation under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2115-2124(in Chinese).
- [6] 郭强, 李志强. 同步调相机发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 6050-6063.
GUO Qiang, LI Zhiqiang. Summarization of Synchronous Condenser Development[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 6050-6063(in Chinese).
 - [7] 赵天骐, 郭金鹏, 张海燕, 等. 考虑调相机的风电场稳态-暂态无功协同优化控制[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(24): 54-65.
ZHAO Tianqi, GUO Jinpeng, ZHANG Haiyan, et al. Steady state-transient state reactive power cooperative optimization control of wind farm considering synchronous condensers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(24): 54-65(in Chinese).
 - [8] 周煜, 王东阳, 李志强, 等. 基于复合指标的新能源场站分布式调相机优化配置方法[J/OL]. 电网技术, 2024: 1-12[2025-03-05]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1683>.
ZHOU Yu, WANG Dongyang, LI Zhiqiang, et al. Configuration method of distributed synchronous condenser in new energy stations based on composite index[J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-12[2025-03-05]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1683> (in Chinese).
 - [9] 林俐, 崔灏, 徐宁. 计及短路比约束的新能源基地构网型场站与调相机协调配置策略[J]. 电力系统自动化, 2024: 1-19[2025-04-15]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250411.1144.006>.
LIN Li, CUI Hao, XU Ning. Coordinated configuration strategy of grid-forming stations and synchronous condensers in renewable energy base considering short-circuit ratio constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024: 1-19[2025-04-15]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250411.1144.006> (in Chinese).
 - [10] 索之闻, 李晖, 王智冬, 等. 计及边际贡献的新能源场站分布式调相机投资收益评估方法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(8): 66-75.
SUO Zhiwen, LI Hui, WANG Zhidong, et al. Evaluation method for investment revenue of distributed synchronous condensers in renewable energy station considering marginal contribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(8): 66-75(in Chinese).
 - [11] 杨浩, 刘虎, 丁肇豪, 等. 计及短路比提升与暂态过电压抑制的含高比例风电送端电网两阶段式调相机优化配置[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 540-52.
YANG Hao, LIU Hu, DING Zhaohao, et al. Two-stage optimal configuration of condenser for high-proportion wind power sending-end power grid considering short circuit ratio increase and transient overvoltage suppression[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 540-52(in Chinese).
 - [12] 张建坡, 孟凡, 吴林林, 等. 基于电气参数加权占比的新能源场站分布式调相机容量配置研究[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4185-95.
ZHANG Jianpo, MENG Fan, WU Linlin, et al. Research on distributed condenser capacity configuration of new energy field station based on the weighted proportion of electrical parameters index[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4185-95(in Chinese).
 - [13] 马宁宁, 谢小荣, 唐健, 等. “双高”电力系统宽频振荡广域监测与预警系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 457-464.
MA Ningning, XIE Xiaorong, TANG Jian. Wide-area measurement and early warning system for wide-band oscillations in “double-high” power systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 457-464(in Chinese).
 - [14] YAO Jun, WANG Xuwei, LI Jiawei, et al. Sub-synchronous

- resonance damping control for series-compensated DFIG-based wind farm with improved particle swarm optimization algorithm[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(2): 849-859.
- [15] 刘纯, 赵牧驰, 汪海蛟, 等. 新能源同步发电机阻抗建模及其对宽频振荡的抑制作用[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3595-3603. LIU Chun, ZHAO Muchi, WANG Haijiao, et al. Modelling of sequence impedance of renewable energy synchronous generator and its suppression effect on broadband oscillation[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3595-3603(in Chinese).
- [16] 陈宝平, 林涛, 陈汝斯, 等. 机侧与网侧多通道附加阻尼控制器参数协调综合抑制低频振荡和次同步振荡[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 50-56, 62. CHEN Baoping, LIN Tao, CHEN Rusi, et al. Parameter coordination of generator-side and grid-side multi-channel supplementary damping controllers to suppress low-frequency oscillation and sub-synchronous oscillation comprehensively[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, (11): 50-56, 62(in Chinese).
- [17] SINGH M, ALLEN A J, MULJADI E, et al. Interarea oscillation damping controls for wind power plants[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 967-975.
- [18] 施星宇, 傅俊诚, 李泽文, 等. 基于数据驱动鲁棒控制的双馈风机区间振荡附加阻尼控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(7): 2633-2644. SHI Xingyu, FU Juncheng, LI Zewen, et al. An inter-area oscillation supplementary damping control for DFIG wind farm based on data-driven robust control[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(7): 2633-2644(in Chinese).
- [19] CHEN Meng, ZHOU Dao, BLAABJERG F. Active power oscillation damping based on acceleration control in paralleled virtual synchronous generators system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 9501-9510.
- [20] 李生虎, 张奥博, 夏伟健, 等. 并网 DFIG 多通道附加阻尼控制器设计及其控制参数整定[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(07): 73-79. LI Shenghu, ZHANG Aobo, XIA Weijian, et al. Design and parameter setting for multi-band supplementary damping controller of system integrated DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 73-79(in Chinese).
- [21] ZHANG Xu, XIE Xiaorong, SHAIR J, et al. A grid-side subsynchronous damping controller to mitigate unstable SSCI and its hardware-in-the-loop tests[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1548-1558.



吕镇珩

在线出版日期: 2025-07-21。

收稿日期: 2025-05-21。

作者简介:

吕镇珩(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制, E-mail: 202334735@mail.sdu.edu.cn;

郑文涛(2002), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制, E-mail: 202434699@mail.sdu.edu.cn;

郭祥源(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制, E-mail: 202414639@mail.sdu.edu.cn;

李欢(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统小干扰稳定性分析, E-mail: 202334712@mail.sdu.edu.cn;

褚晓东(1978), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制、智能算法在电力系统中的应用, E-mail: chuxd@sdu.edu.cn;

牟倩颖(1992), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为新型电力系统稳定性分析与控制, E-mail: mouqy@sdu.edu.cn。

(责任编辑 马晓华)