

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230849

基于自适应准谐振控制的储能抑制广义强迫振荡传播方法

于建平¹, 余一平¹, 许剑冰², 吴家龙², 徐海波², 鞠平¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 针对新能源随机激励引发特高压联络线功率振荡向外部电网传播的问题, 提出一种基于自适应准谐振控制的储能抑制广义强迫振荡传播方法。首先, 建立了含有储能系统(energy storage system, ESS)的电力系统等效模型, 分析了在随机激励下, ESS 输出功率对广义强迫振荡通过特高压联络线向外部电网传播的影响机理。其次, 利用自适应准谐振控制器对广义强迫振荡信号进行无差跟踪, 并对 ESS 有功功率指令进行修正。在此基础上, 利用系统功率传播的传递函数, 分析了自适应准谐振控制对广义强迫振荡传播的抑制机理, 并将其与传统谐振控制进行对比。最后通过仿真验证了分析的准确性, 结果表明: 在控制方向与振荡传播方向相同时, 自适应准谐振控制能够有效阻断广义强迫振荡的传播; 反之, 则无法完全抑制广义强迫振荡, 但能够显著降低振荡的幅值。

关键词: 储能系统; 强迫振荡; 谐振控制; 随机激励; 稳定控制

Energy storage suppression method of generalized forced oscillation propagation based on adaptive quasi-resonant control

YU Jianping¹, YU Yiping¹, XU Jiabing², WU Jialong², XU Haibo², JU Ping¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Nanrui Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: This paper proposes an energy storage-based method using adaptive quasi-resonant control to suppress the propagation of power oscillations in ultra-high voltage transmission lines induced by random excitation in new energy sources. First, an equivalent model of the power system, including the energy storage system (ESS), is established to analyze the mechanism of how the output power of the ESS affects the propagation of power oscillations to the external grid via the ultra-high voltage transmission line under random excitation. Secondly, an adaptive quasi-resonant controller is employed to track the generalized forced oscillation signal and adjust the active power command of the ESS. Based on the transfer function of power propagation in the system, the suppression mechanism of adaptive quasi-resonant control on the propagation of power oscillations is analyzed and compared with traditional resonant control. Simulation results validate the accuracy of the analysis, demonstrating that adaptive quasi-resonant control can effectively block the propagation of generalized forced oscillations when the control direction aligns with the propagation direction. Conversely, it cannot completely suppress the oscillations but significantly reduces their amplitude.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5108-202218280A-2-273-XG).

Key words: energy storage system; forced oscillation; resonant control; random excitation; stability control

0 引言

在电力系统“双高”建设的背景下, 新型可再生能源的大量接入导致系统的时变性与不确定性增

加^[1-4], 大规模新能源的并网接入给电力系统带来了更多的随机因素^[5-7]。同时, 扰动源的增多也导致了强迫振荡事件逐渐增多, 对电力系统安全稳定运行造成严重威胁^[8-11]。对于区域内的弱阻尼低频振荡常采用电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)来进行抑制^[12-15], 而对于区域间的强迫振荡抑制方法仍有待进一步研究。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(5108-202218280A-2-273-XG)

文献[16]首次提出了电力系统在随机激励下的广义强迫振荡现象, 新能源随机功率波动频段可能覆盖特高压交流电网大区振荡模式, 进而引发特高压联络线功率振荡。这种“面对点”的激发条件使得强迫振荡发生的概率大大提高, 值得引起重视。然而目前对于强迫振荡抑制的研究多针对于狭义强迫振荡, 对于广义强迫振荡抑制方法研究尚少。

传统的抑制强迫振荡的方法与负阻尼低频振荡抑制方法类似, 都是通过提高系统阻尼比来降低振荡的幅值。文献[17]将传统 PSS 与比例谐振控制器 (proportional resonance controller, PRC) 相结合, 同时将多个 PRC 并联使用, 以更好地抑制多模强迫振荡。文献[18]针对谐波电压引起的逆变器输出波动, 从强迫振荡的角度解释了周期性的功率波动诱发并网逆变器振荡的机理, 并采用直流电压控制环时间尺度的有源阻尼来抑制强迫振荡。文献[19]以抑制交流线路功率振荡为目标, 设计了一种高压直流附加阻尼控制器来提升系统阻尼比, 分析了不同扰动源位置以及直流输送功率下的抑制效果。文献[20]提出一种互补的抑制策略, 基于调优反馈控制估计其强迫振荡频率, 并自动完成滤波器与补偿器对逆变器的调制作用, 抑制强迫振荡的影响。但以上研究都只能降低强迫振荡的幅值, 而无法完全抑制强迫振荡的传播。

近年来储能系统 (energy storage system, ESS) 发展迅速, 由于其响应速度快、能够独立地调整系统有功和无功功率, 因此利用 ESS 抑制系统振荡成为了一种有效的手段^[21-23]。文献[24]从惯性、阻尼及同步特性的角度, 分析了 ESS 抑制电网功率振荡的机理, 并采用功角反馈与频率反馈的策略对振荡进行抑制。文献[25]利用阻尼转矩分析法和特征值分析法对 ESS 有功与无功功率的作用路径与作用机理进行了分析。但上述文献抑制方法仅对负阻尼振荡有效。文献[26]基于插入式改进重复控制器对统一潮流控制器进行改进, 能够有效抑制强迫振荡传播, 但没有针对广义强迫振荡进行研究。

因此, 本文首先分析了 ESS 功率输出对随机激励引发特高压交流联络线广义强迫振荡传播的作用机理, 并对传统的谐振控制器做出改进, 提出一种基于自适应准谐振控制的 ESS 抑制特高压交流电网联络线广义强迫振荡传播方法, 使 ESS 更好地跟踪功率波动, 并结合仿真验证了其有效性。

1 储能抑制广义强迫振荡数学模型

1.1 广义强迫振荡机理

文献[16]从频域的角度介绍了电力系统受到随

机扰动时发生的广义强迫振荡现象。其与传统的狭义强迫振荡不同之处在于: 传统强迫振荡的扰动激励表现为周期性, 而广义强迫振荡则是由覆盖系统某些弱阻尼振荡模式的窄频段随机扰动引起的。由于电力系统实际中所遭受的扰动多为随机激励, 因此广义强迫振荡相较于传统强迫振荡来说发生的概率更大。

根据广义强迫振荡的频域分析方法, 其线性系统表达式^[27]为

$$S_y(f) = |H(f)|^2 S_u(f) \quad (1)$$

式中: $S_y(f)$ 为输出平稳随机过程 y 的功率谱密度; $H(f)$ 为系统的频域传递函数; $S_u(f)$ 为输入平稳随机过程 u 的功率谱密度 (power spectral density, PSD)。

由式(1)可知, $S_y(f)$ 与 $|H(f)|^2$ 、 $S_u(f)$ 呈正相关关系, 只有当 $|H(f)|^2$ 与 $S_u(f)$ 的值均较大时, $S_y(f)$ 的值才会较大, 此时表现为广义强迫振荡现象。对于 $|H(f)|^2$ 大小的确定方式, 以某一振荡模式举例, 该模式下的 $|H(f)|^2$ 表达式为

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{4\pi^2(f_i^2 - f^2) + \sigma_i(\sigma_i + j4\pi f)} \quad (2)$$

式中: f_i 表示该振荡模式对应的固有振荡频率; f 为频率; σ_i 表示该振荡模式对应的特征根实部。

将式(2)与式(1)联立, 可得到该振荡模式下的广义强迫振荡输入-输出示意图如图 1 所示。

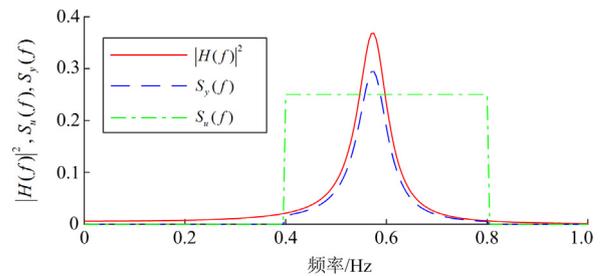


图 1 广义强迫振荡输入-输出示意图

Fig. 1 Input-output schematic of generalized forced oscillation

由图 1 可知, 红色曲线的尖峰即表示系统存在的弱阻尼振荡模式, 当随机激励功率谱幅值较大的频段覆盖了系统这一弱阻尼模式的频率时, 系统输出的功率谱幅值也就较大, 表明此时系统发生较大的振荡, 且振荡中包含该弱阻尼模式的频率, 这种振荡即上文所述的广义强迫振荡。下文将对电力系统中广义强迫振荡现象的抑制方法进行研究。

1.2 储能对广义强迫振荡的影响模型建立

为了研究 ESS 对广义强迫振荡的影响机理, 首

先建立含有 ESS 的电力系统等效模型,如图 2 所示。其中,发电机采用经典二阶模型, E_g 、 δ_g 分别表示发电机电压幅值、相角; ΔP_m 为发电机机械功率增量; X'_d 为发电机瞬态电抗; X_T 为变压器漏抗; X_0 、 X_1 、 X_2 分别为 3 条传输线路等效电抗; $E_b \angle 0^\circ$ 为外部电网电压幅值。

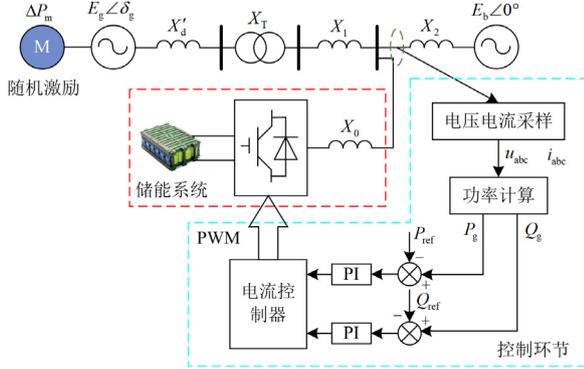


图 2 含有储能系统的电力系统等效模型

Fig. 2 Equivalent model of power system with energy storage system

当发电机受到随机激励的作用而发生广义强迫振荡时, ESS 通过采样外部电网所在节点的电压 u_{abc} 、电流 i_{abc} , 计算联络线传输有功功率 P_g 与无功功率 Q_g , 并动态调整有功参考功率 P_{ref} 与无功参考功率 Q_{ref} , 向系统注入变化的有功功率与无功功率, 从而抑制本地的功率振荡向外部电网传播, 并且可以改变发电机的电磁功率, 抑制发电机输出功率振荡。同时, ESS 的动态电磁过程时间很短, 因此可简化为可控电流源, 其向系统注入的电流 \dot{I}_b 可表示为

$$\dot{I}_b = I_{bd} + jI_{bq} \quad (3)$$

式中, I_{bd} 和 I_{bq} 分别为注入系统电流的 d 轴和 q 轴分量。ESS 通过控制电流的幅值和相位来改变注入系统的有功功率与无功功率。

定义发电机与 ESS 之间的总电抗为 X_3 , 则上述系统的等效电路如图 3 所示。图中, P_c 、 Q_c 分别为发电机输出有功功率与无功功率; P_b 、 Q_b 分别为 ESS 向系统注入的有功功率与无功功率。

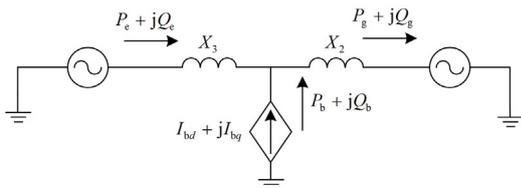


图 3 系统简化等效电路图

Fig. 3 Simplified equivalent circuit of the system

同步发电机采用二阶经典模型, 其转子运动方程为

$$\begin{cases} 2H \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_c - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_0(\omega - \omega_0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: H 为发电机惯性时间常数; P_m 为发电机机械功率; D 为发电机阻尼转矩系数; ω 为转子角速度; ω_0 为系统基准角速度; δ 为发电机功角。

将式(4)在工作点处进行线性化, 可得

$$\begin{cases} 2H \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_c - D\Delta\omega \\ \frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_0\Delta\omega \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta\omega$ 为转子角速度增量; ΔP_c 为发电机电磁功率增量; $\Delta\delta$ 为发电机功角增量。

广义强迫振荡的来源可分为机械扰动部分与电气扰动部分, 本文主要针对机械扰动部分中的发电机机械功率扰动进行研究。在 ESS 接入的前提下, 当发电机机械功率受到随机扰动时, 其机械功率与有功功率增量可表示为

$$\begin{cases} \Delta P_m = \Delta P_d \\ \Delta P_c = K_p\Delta\delta - K_1P_b - K_2Q_b \end{cases} \quad (6)$$

式中: ΔP_d 为广义强迫振荡扰动量; K_p 为同步转矩系数, 表示发电机自身保持稳定运行的能力; K_1 、 K_2 分别为 ESS 输出的有功功率与无功功率对发电机有功功率的影响系数, 其值在 0~1 之间, 由 ESS 与发电机之间的电气距离决定。

将式(5)、式(6)联立, 可得到在 ESS 和随机扰动共同影响下的同步发电机二阶微分方程为

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \frac{D}{\omega_0} \frac{d\Delta\delta}{dt} + K_p\Delta\delta = \Delta P_d + K_1P_b + K_2Q_b \quad (7)$$

由图 3 可知, 系统向外部电网传输功率波动 ΔP_g 的表达式为

$$\Delta P_g = \Delta P_c + P_b \quad (8)$$

根据式(7)、式(8)可得到含有 ESS 的电力系统线性化传递函数框图, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 发电机有功功率的增量可分为两部分: 发电机功角变化与 ESS 功率调整。发电机功率振荡向外界电网传播的源头在于发电机功角变化, ESS 功率调整则起到抑制作用。首先在不考虑 ESS 功率调整的情况下, 即 $P_b = Q_b = 0$, 根据图 4 可得到 ΔP_d 与 ΔP_g 之间的传递函数表达式为

$$H_1(s) = \frac{\Delta P_g}{\Delta P_d} = \frac{\omega_0 K_p}{2Hs^2 + Ds + \omega_0 K_p} \quad (9)$$

令 $s = j\omega$, $H_1(s)$ 的幅频表达式为

$$|H_1(j\omega)| = \frac{K_p \omega_0}{2H\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 \omega_n^2}} \quad (10)$$

式中: ω_n 表示系统的固有振荡频率, $\omega_n = \sqrt{\omega_0 K_p / (2H)}$; ξ 表示阻尼比, $\xi = D\sqrt{H / (2\omega_0 K_p)}$ 。可以看出, 系统固有振荡频率主要受到同步转矩系数的影响, 而系统阻尼比主要受到阻尼转矩系数的影响。

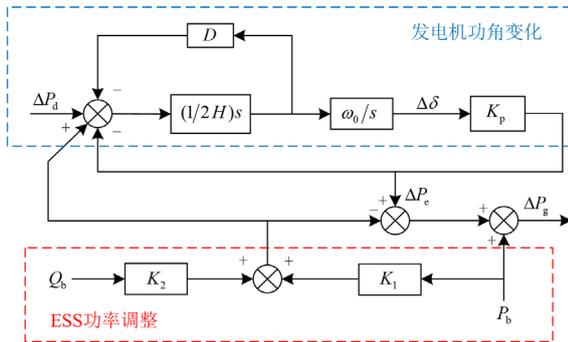


图4 含有储能系统的电力系统线性化传递函数框图

Fig. 4 Block diagram of linearized transfer function of power system with energy storage system

由 1.1 节的分析可知, 扰动频率在固有振荡模式附近时会引发系统的剧烈振荡, 此时的 $H_1(s)$ 幅值最大, 其值为

$$|H_1(j\omega)|_{\omega=\omega_n} = \frac{K_p \omega_0}{4H\xi\omega_n^2} \quad (11)$$

式(11)可表征当系统发生广义强迫振荡时, 系统向外部电网传输功率波动 ΔP_g 对扰动量 ΔP_d 的放大作用。同时, 通过增大系统阻尼比的方法可以减弱振荡的传播, 但依靠 PSS 等设备增大发电机转矩系数 D 的抑制效果有限。

由表 1 可知随着发电机转矩系数的增大, 系统的阻尼比也随之增大, 但即使系统处于强阻尼状态下, $H_1(s)$ 幅值的最大值仍然处于较高水平, 表明

表 1 不同阻尼转矩下系统特征根、阻尼比与最大幅值

Table 1 Characteristic root, damping ratio and maximum value of system with different damping torques

D	特征根	$\xi / \%$	$ H_1(j\omega) _{\omega=\omega_n}$
2	$-0.25 \pm j7.90$	3.16	15.77
6	$-0.75 \pm j7.87$	9.49	5.28
10	$-1.25 \pm j7.81$	15.80	3.20

系统仍会发生广义强迫振荡。因此, 下面提出一种基于自适应准谐振控制器的 ESS 抑制广义强迫振荡方法, 并在考虑 ESS 功率调整的情况下, 对系统广义强迫振荡抑制机理进行分析。

2 储能抑制广义强迫振荡方法研究

2.1 谐振控制器原理

根据内模原理^[28], 若要对某一输入信号进行无差跟踪, 系统的开环传递函数需要包含与之相同的动力学模型。因此, 传统的比例-积分控制器无法针对功率振荡这类交流信号进行无差跟踪, 而谐振控制器则能够实现这一目标, 其表达式为

$$G_{RC}(s) = \frac{K_r s}{s^2 + \omega_c^2} \quad (12)$$

式中: K_r 为谐振系数; ω_c 为谐振角频率。

当 K_r 、 ω_c 分别发生变化时, 谐振控制器对应的幅频特性曲线如图 5、图 6 所示。

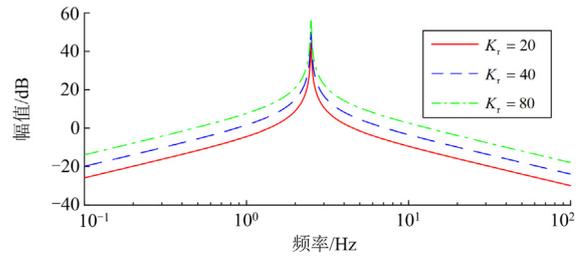


图 5 K_r 变化时 $G_{RC}(s)$ 幅频特性

Fig. 5 Amplitude-frequency characteristics of $G_{RC}(s)$ when K_r changes

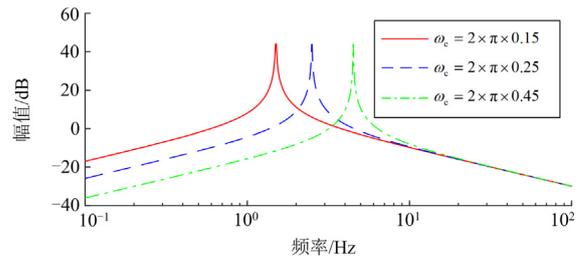


图 6 ω_c 变化时 $G_{RC}(s)$ 幅频特性

Fig. 6 Amplitude-frequency characteristics of $G_{RC}(s)$ when ω_c changes

由图 5 和图 6 可知, 在谐振频率处控制器增益为无穷大, 表明能够很好地追踪该频率的信号。其中, ω_c 是影响谐振控制器响应频率的参数, K_r 是影响谐振控制器增益的参数。因此, 应将 ω_c 设定在振荡频率处, 并适当增大 K_r 提高其在其他频率下的增益, 但过大的 K_r 会导致系统稳定性降低。

对于广义强迫振荡而言，其特性表现出包含多频率的随机功率振荡，而传统的谐振控制器只能针对单个频率进行无差追踪，控制器谐振频率以外的增益将迅速衰减，甚至会降到负值。工程上常采用准谐振控制器来提供一定的频率带宽，其表达式为

$$G_{\text{QRC}}(s) = \frac{2K_r \omega_b s}{s^2 + 2\omega_b s + \omega_c} \quad (13)$$

式中， ω_b 为谐振带宽。 $G_{\text{QRC}}(s)$ 的幅频特性曲线如图 7 所示。

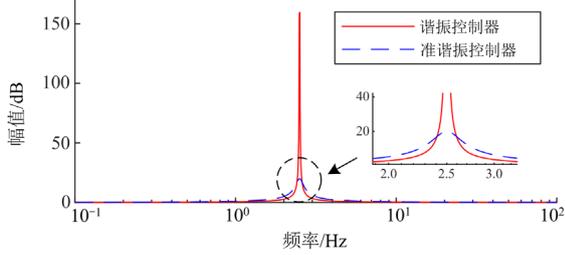


图 7 谐振控制器与准谐振控制器幅频特性对比

Fig. 7 Comparison of amplitude-frequency characteristics between resonant controller and quasi-resonant controller

由图 7 可以看出，与谐振控制器相比，准谐振控制器在谐振频率处的增益明显降低，换来的是获得了一定程度的频率带宽，但当随机激励的频率波动范围较大时，准谐振控制器也无法解决在较宽频段下的无差跟踪问题。因此，须对准谐振控制器进行改进使其能够根据振荡频率的变化进行动态调整。

2.2 自适应准谐振控制器设计

将式(13)改写为闭环形式，如式(14)所示。

$$G_{\text{QRC}}(s) = \frac{Z/s}{1 + ZC/s + ZI/s^2} \quad (14)$$

式中： $Z = 2K_r \omega_b$ ； $C = 1/K_r$ ； $I = \omega_c^2 / (2K_r \omega_b)$ 。

根据 2.1 节分析可知， ω_c 是影响谐振频率的主要因素，因此应选取 I 作为自适应动态调节的目标，控制器输出为 ESS 的有功功率参考值 P_b ，控制器输入选取为 ΔP_g ，假设其表现为 $\Delta P_g = A_g \sin(\omega_g t)$ ，其中， A_g 为输入信号幅值； ω_g 为输入信号角频率。当 ω_c 始终被控制为与输入信号频率相同时， I 的表达式为

$$I = \frac{\omega_g^2}{2K_r \omega_b} \quad (15)$$

式(15)说明参数 I 与振荡角频率 ω_g 呈正比例非线性关系。此时控制器输出 P_b 表达式为

$$P_b = A_g |G(j\omega_g)| \sin(\omega t + \angle G(j\omega_g)) \quad (16)$$

其中：

$$\begin{cases} |G(j\omega_g)| = \frac{Z\omega_g}{\sqrt{(ZI - \omega_g^2)^2 + (ZC\omega_g)^2}} \\ \angle G(j\omega_g) = \arctan \frac{ZI - \omega_g^2}{ZC\omega_g} \end{cases}$$

当 $\omega_g = \omega_c$ 时， $P_b = A_g \sin(\omega_g t)$ ，即与输入信号 ΔP_g 同频同相。而当 ω_g 发生变化时，应根据保持输入输出相位差为 0 的原则来调整 I 的值。调整方向为：若 $\omega_g > \omega_c$ ，则应增大 I 使控制器相位保持不变；若 $\omega_g < \omega_c$ ，则应减小 I 使控制器相位保持不变。另外，由于当输入信号频率发生变化时，输入信号与输出信号的差在小区间 $(-\varepsilon, \varepsilon)$ 内与输入信号频率近似呈线性关系^[29]，因此在 ESS 功率自适应控制环节中可以将 ω_g 与 ω_c 之间的关系等效为 P_b 与 ΔP_g 之间的关系。

根据式(14)、式(15)及以上分析，可得到自适应准谐振控制器的传递函数框图如图 8 所示。

当系统受到随机激励的干扰时，自适应准谐振控制器的幅频特性如图 9 所示。

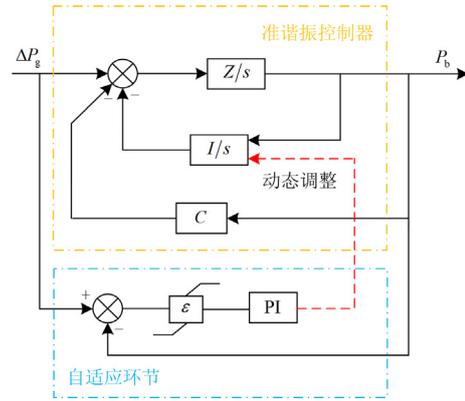


图 8 自适应准谐振控制器传递函数框图

Fig. 8 Transfer function block diagram of adaptive quasi-resonant controller

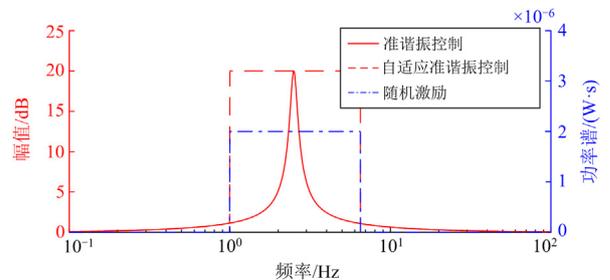


图 9 随机激励下自适应准谐振控制器幅频特性

Fig. 9 Amplitude-frequency characteristics of adaptive quasi-resonant controller under random excitation

可以看出, 自适应准谐振控制器能够在扰动频段内始终保持最大增益, 在扰动频段外的幅频特性则与准谐振控制器相同。而准谐振控制器则只有在谐振点处增益最大, 在谐振点附近衰减较快。因此, 自适应准谐振控制能够更好地追踪一个频段内的随机激励信号。设置 $Z=6$, $C=0.5$, $I=1$, 自适应准谐振控制器的输入输出波形如图 10 所示, 验证了自适应准谐振控制器能够无差跟踪频率不断变化的交流信号。

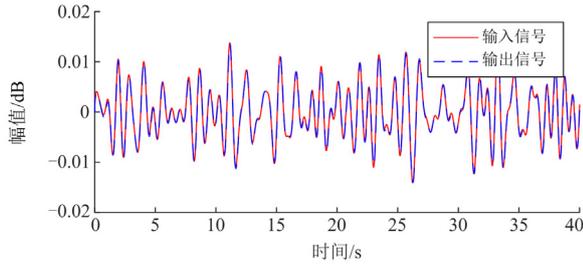


图 10 自适应准谐振控制器输入信号与输出信号对比
Fig. 10 Comparison of input signal and output signal of adaptive quasi-resonant controller

图 11 表示 5 s 时输入信号频率由 6 Hz 突变至 8 Hz, 其中 $K_r=1$, $\omega_b=2\pi\times 15$ rad/s, 此时控制参数 I 的值由 9.1 上升到 9.7, 与根据式(15)计算得到的理论值一致, 表明自适应准谐振控制能够准确地将谐振频率调整至振荡频率处。

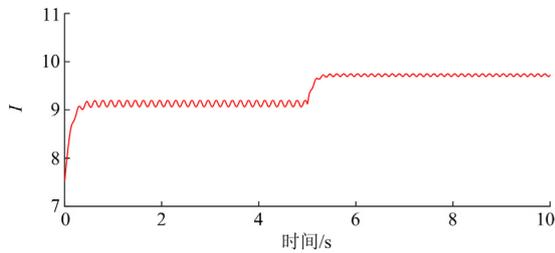


图 11 输入信号频率变化时 I 值

Fig. 11 Value of I when the frequency of the input signal changes

2.3 储能对广义强迫振荡抑制分析

在考虑 ESS 功率调整的情况下, 由于 K_2 比 K_1 小得多, 因此为了计算方便可以忽略 Q_b 对 ΔP_c 的影响, 根据图 4 可写出 ΔP_d 与 ΔP_g 之间的传递函数表达式为

$$H_2(s) = \frac{\Delta P_g}{\Delta P_d} = \frac{K_p \Delta \delta + (1 - K_1) P_b}{\Delta P_d} \quad (17)$$

当 ESS 采用自适应准谐振控制时, 将图 2 中 PI 控制器更换为自适应准谐振控制器, 其有功功率输出表达式为

$$P_b(s) = G_{\text{QRC}}(s) \Delta P_g(s) \quad (18)$$

将式(9)、式(17)和式(18)联立, 整理可得

$$H_2(s) = \frac{\omega_b K_p}{(2Hs^2 + Ds + \omega_b K_p)[1 + (K_1 - 1)G_{\text{QRC}}(s)]} \quad (19)$$

式(9)、式(19)分别表示 ESS 接入前与接入后的系统传递函数表达式, 同时, 通过修改控制器的表达式可以获得 ESS 在不同控制方式下的系统传递函数。据此, 画出其在不同控制方式下的系统传递函数幅频特性曲线如图 12 所示。

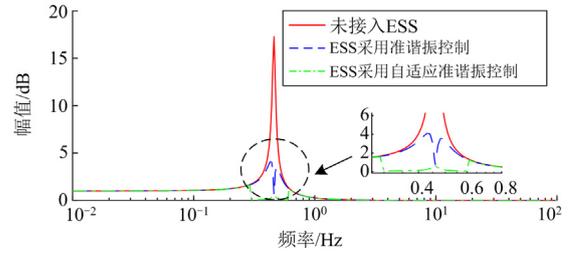


图 12 ESS 接入前后系统的幅频特性对比

Fig. 12 Comparison of amplitude-frequency characteristics of the system before and after ESS access

由图 12 可知, 未接入 ESS 时系统存在一个 0.46 Hz 左右的振荡模式。当 ESS 采用准谐振控制接入系统时, 只对 0.46 Hz 及附近小区间内的频率扰动抑制效果较好, 其能够提供的谐振带宽不足以完全抑制广义强迫振荡。而在采用自适应准谐振控制后, 系统传递函数幅值在振荡频率附近几乎被降低为 0 dB, 表示能够完全抑制整个广义强迫振荡频段内的功率波动。

上述分析的前提为广义强迫振荡的传播方向与控制信号方向一致, 而当二者方向相反时, 说明扰动源位置在发电机与 ESS 所在区域之外, 此时若仍将 ESS 功率控制目标设置为将 ΔP_g 抑制为 0, 即 $P_b(s) = -G_{\text{QRC}}(s) \Delta P_g(s)$, 则扰动功率增量与发电机电磁功率增量为

$$\begin{cases} \Delta P_d = \Delta P_g - P_b = -P_b \\ \Delta P_c = K_p \Delta \delta - K_1 P_b - K_2 Q_b \end{cases} \quad (20)$$

根据式(20), 可将式(7)改写为

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{D}{\omega_0} \frac{d \Delta \delta}{dt} + K_p \Delta \delta = (K_1 - 1) P_b + K_2 Q_b \quad (21)$$

采用的分析方法与上文类似, 此处不再赘述, 整理出 ΔP_c 与 ΔP_d 之间的传递函数表达式为

$$H_3(s) = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_d} = (K_1 - 1)(2Hs^2 + Ds + \omega_b K_p) \quad (22)$$

式(22)的幅频特性曲线如图 13 所示, 可以看出, 当广义强迫振荡传播方向与控制方向相反时, 外部电网的功率振荡仍会传播到本区域电网内, 此时

ESS 可等效地看作本区域内新的扰动源，因此发电机仍会出现广义强迫振荡现象。但系统传递函数的幅值有明显的降低，表明即使在控制方向相反时，ESS 仍然能够显著降低广义强迫振荡幅值。

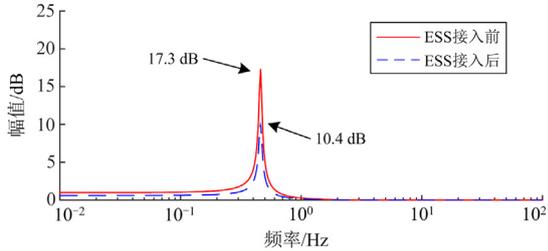


图 13 控制方向相反时系统的幅频特性

Fig. 13 Amplitude-frequency characteristics of the system when the control direction is opposite

3 仿真算例

本文利用 Matlab/Simulink 仿真软件在四机两区系统中对 ESS 抑制广义强迫振荡传播的方法进行验证，在节点 7 的位置接入 ESS，系统结构如图 14 所示。由小干扰稳定分析可知，联络线固有振荡频率为 0.64 Hz。ESS 功率控制目标为抑制节点 7 与节点 10 之间的联络线功率振荡。

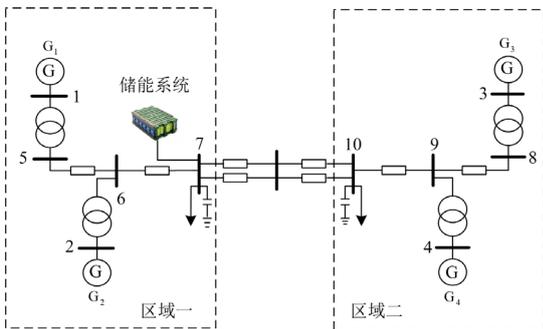


图 14 四机两区系统结构图

Fig. 14 Structure diagram of the four-machine two-area system

3.1 场景一：控制方向与振荡传播方向一致

假设系统内某一同步发电机调速器出口处受到频段为 0.5~1.5 Hz、幅值为 1.5% P_m 内随机激励的机械功率扰动，扰动频率覆盖了 0.64 Hz 的联络线固有振荡频率，引发了系统的广义强迫振荡。随机激励的功率谱与时域序列如图 15 和图 16 所示。

首先，当随机扰动发生在发电机 G_1 处，且自适应准谐振控制方向与广义强迫振荡传播方向一致，即线路 L7-10 的功率流动方向。此时对 ESS 未接入、ESS 采用谐振控制、ESS 采用自适应准谐振控制 3 种情况进行仿真，联络线功率振荡情况如图 17 所示。

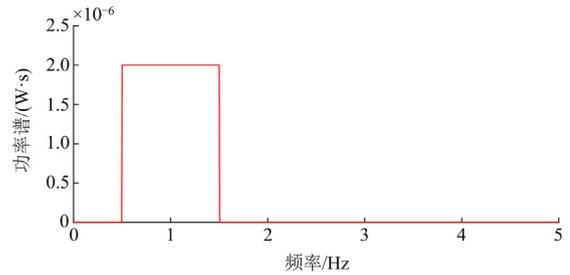


图 15 随机激励功率谱

Fig. 15 Power spectrum of random excitation

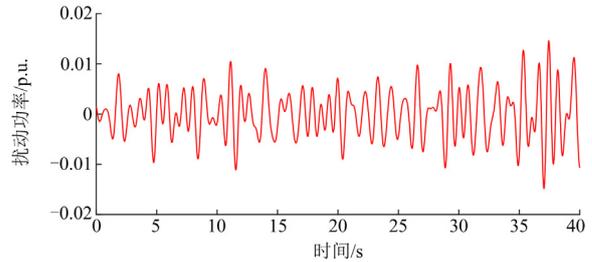


图 16 随机扰动功率时域图

Fig. 16 Time domain diagram of random disturbance power

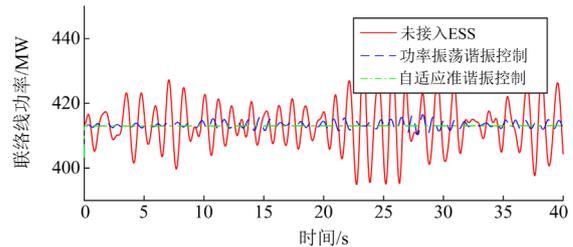


图 17 G_1 发生扰动时联络线功率振荡情况

Fig. 17 Power oscillation of contact line when G_1 is disturbed

可以看出，由于谐振控制无法动态调整自身的谐振频率，因此对包含多频率的随机功率波动虽与 ESS 接入前相比有一定的抑制作用，但抑制效果相对较弱。自适应准谐振控制则能够根据振荡频率变化动态调整谐振频率，对广义强迫振荡的传播几乎可抑制为 0。

此外，区域一内两台发电机的功率振荡情况如图 18 所示。由图 18 可知，除了抑制振荡的传播，ESS 同样能够抑制本区域内发电机的功率振荡。由于 ESS 与发电机 G_2 距离更近，因此对 G_2 的振荡抑制效果要优于 G_1 ，说明 ESS 应尽可能安装在与发电机相距较近的母线上。同时，自适应谐振控制对于发电机振荡的抑制效果也要优于谐振控制。

区域二内两台发电机的功率振荡情况如图 19 所示。可以看出，由于谐振控制无法完全抑制广义强迫振荡的传播，因此振荡依旧会传播到区域二并

引起区域二内两台发电机的功率振荡, 振荡幅值与 ESS 接入前略有降低。自适应准谐振控制由于完全抑制了振荡向区域二传播, 因此发电机 G_3 、 G_4 均无振荡现象。

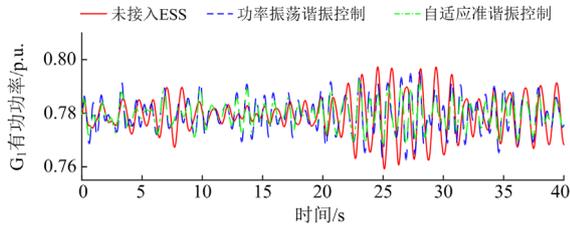


图 18 G_1 发生扰动时区域一内两台发电机输出功率
Fig. 18 Output power of two generators in area I when G_1 is disturbed

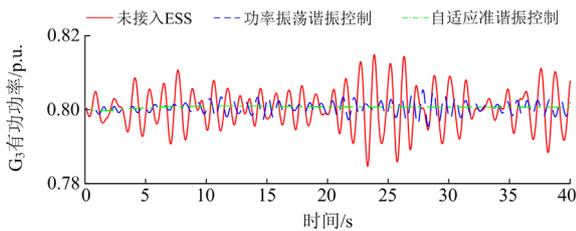


图 19 G_1 发生扰动时区域二内两台发电机输出功率
Fig. 19 Output power of two generators in area II when G_1 is disturbed

若与上文相同的随机扰动发生在发电机 G_3 调速器出口处, 此时广义强迫振荡传播方向变更为由区域二到区域一, 因此将 ESS 控制方向更改为线路 L7-6 的功率流动方向, 此时线路 L7-6 传输功率如图 20 所示。由图 20 可知, 修改控制方向后的 ESS 仍能够有效抑制外部电网功率振荡传递到本地电网内部, 控制效果与前文相同, 验证了本文所提方法对区域内与区域外广义强迫振荡传播抑制均具有有效性。

此时, 系统内 4 台发电机的输出功率分别如图 21 和图 22 所示。采用自适应准谐振控制的 ESS 能够完全阻断广义强迫振荡传播到区域一内两台发电

机处, 因此区域一内两台发电机输出不受影响; 而由于 ESS 安装位置距离区域二较远, 其对区域二内两台发电机 G_3 、 G_4 的功率振荡抑制效果相对较弱。

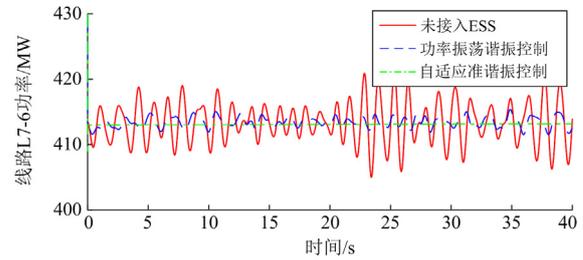


图 20 G_3 发生扰动时线路 L7-6 传输功率
Fig. 20 Transmission power of line L7-6 when G_3 is disturbed

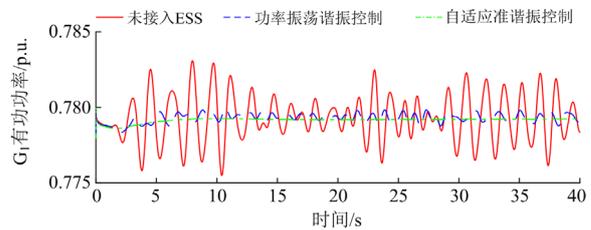


图 21 G_3 发生扰动时区域一内两台发电机输出功率
Fig. 21 Output power of two generators in area I when G_3 is disturbed

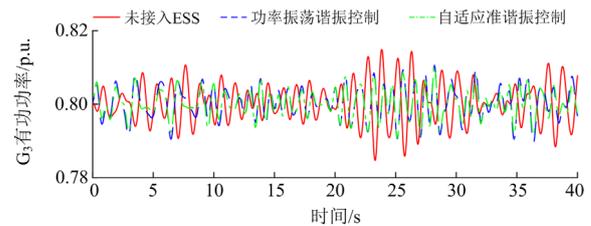


图 22 G_3 发生扰动时区域二内两台发电机输出功率
Fig. 22 Output power of two generators in area II when G_3 is disturbed

3.2 场景二: 控制方向与振荡传播方向不一致

由于实际电网运行过程中很难快速确认扰动源

的位置,可能会出现 ESS 控制方向与振荡传播方向相反的情况,下面将针对此场景进行仿真验证。设置随机扰动发生在发电机 G_3 调速器出口处,广义强迫振荡传播方向为区域二到区域一,ESS 控制方向与之相反,此时线路 L7-6 传输功率如图 23 所示。

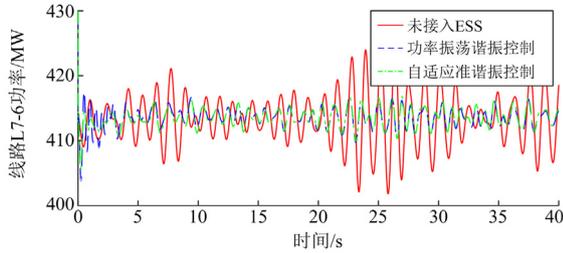


图 23 G_3 发生扰动时线路 L7-6 传输功率(控制方向与振荡传播方向相反)

Fig. 23 Transmission power of line L7-6 when G_3 is disturbed (The direction of control is opposite to the direction of oscillation propagation)

由图 23 可知,当二者方向相反时,自适应准谐振控制无法完全抑制广义强迫振荡传播到区域一内,其抑制效果与谐振控制相差不大。但其仍然能够显著降低振荡的幅值,减弱振荡的传播,这与 2.3 节的分析结果相吻合。

同时,系统内 4 台发电机的输出功率分别如图 24 和图 25 所示。可以看出,由于该场景下 ESS 未能完全抑制广义强迫振荡的传播,因此区域一内两台发电机仍然存在振荡的情况,但由于振荡的传播被削弱,发电机 G_1 、 G_2 的振荡幅值均低于未安装 ESS 的情况,说明在控制方向相反的情况下准谐振

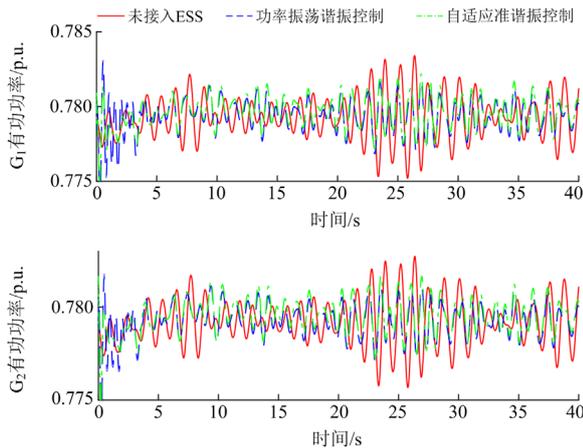


图 24 G_3 发生扰动时区域一内两台发电机输出功率(控制方向与振荡传播方向相反)

Fig. 24 Output power of two generators in area I when G_3 is disturbed (The direction of control is opposite to the direction of oscillation propagation)

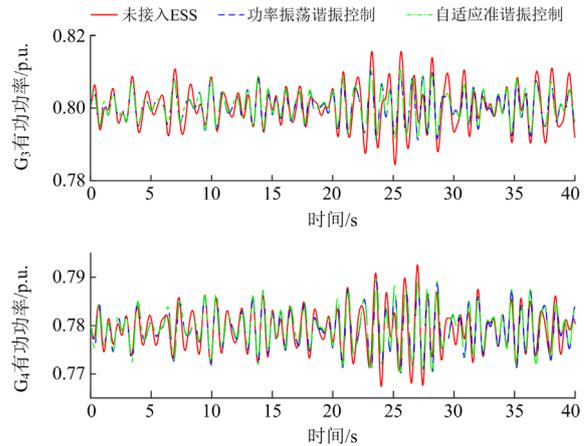


图 25 G_3 发生扰动时区域二内两台发电机输出功率(控制方向与振荡传播方向相反)

Fig. 25 Output power of two generators in area II when G_3 is disturbed (The direction of control is opposite to the direction of oscillation propagation)

控制依然有一定的效果;对于区域二内的两台发电机,由于 ESS 与之距离较远,因此其对 G_3 、 G_4 的功率振荡抑制效果不明显。

4 结论

本文利用含有 ESS 的电力系统等效模型,分析了 ESS 对特高压交流电网广义强迫振荡传播的影响机理,设计了基于自适应准谐振控制的 ESS 抑制特高压联络线广义强迫振荡传播的控制策略。仿真结果表明:

- 1) 当控制方向与振荡传播方向一致时,ESS 能够完全阻断振荡向外部电网的传播,有效防止外部电网的发电机发生振荡。
- 2) 当控制方向与振荡传播方向不一致时,ESS 虽无法完全抑制广义强迫振荡的传播,但也能够显著降低振荡传播的幅值。
- 3) 对于发电机的功率振荡,ESS 与发电机距离越远,对其抑制效果越弱。

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): 461-475.
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): 461-475.

[2] 李婷,胥威汀,刘向龙,等. 含高比例可再生能源的交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.
- [3] WEN Shifan, XIONG Wenjun, CAO Jinde, et al. MPC-based frequency control strategy with a dynamic energy interaction scheme for the grid-connected microgrid system[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2020, 357(5): 2736-2751.
- [4] 程静, 苏乐, 岳雷. 双馈风电并网系统的宽频振荡机理分析与抑制[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(12): 1-13. CHENG Jing, SU Le, YUE Lei. Mechanism analysis and suppression of broadband oscillation in a DFIG wind power grid-connected system[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(12): 1-13.
- [5] QIU Yiwei, LIN Jin, CHEN Xiaoshuang, et al. Nonintrusive uncertainty quantification of dynamic power systems subject to stochastic excitations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(1): 402-414.
- [6] 王冲, 王秀丽, 鞠平, 等. 电力系统随机分析方法研究综述[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(3): 184-199. WANG Chong, WANG Xiuli, JU Ping, et al. Review of research on power system stochastic analysis methods[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(3): 184-199.
- [7] 鞠平, 王冲, 辛焕海, 等. 电力系统的柔性、弹性与韧性研究[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(11): 1-7. JU Ping, WANG Chong, XIN Huanhai, et al. Flexibility, resilience and toughness of power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(11): 1-7.
- [8] 戴珍, 曹尚, 黄文琦, 等. 基于广域测量数据驱动的电力系统强迫振荡源定位[J]. *电力信息与通信技术*, 2023, 21(6): 24-30. DAI Zhen, CAO Shang, HUANG Wenqi, et al. Forced oscillation location in power systems using wide area measurement data-driven method[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2023, 21(6): 24-30.
- [9] YUAN Zhi, VENKATASUBRAMANIAN V. Analysis of energy flow method for oscillation source location[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(2): 1338-1349.
- [10] 栾某德, 甘德强, 李振垚, 等. 基于模型响应功率谱密度预测的强迫振荡扰动源设备定位法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(22): 111-119. LUAN Moude, GAN Deqiang, LI Zhenyao, et al. Location method for forced oscillation source device based on power spectral density prediction of model responses[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(22): 111-119.
- [11] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(6): 10-20. WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(6): 10-20.
- [12] 吴剑超, 李登峰, 霍承祥, 等. 一种抑制全域低频振荡的新型电力系统稳定器研究[J]. *电网技术*, 2022, 46(3): 1135-1141. WU Jianchao, LI Dengfeng, HUO Chengxiang, et al. New type of power system stabilizer restraining global low-frequency oscillation[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(3): 1135-1141.
- [13] 古庭贇, 杨骐嘉, 徐梅梅, 等. 改善区域间振荡阻尼的快速功率调制策略研究[J]. *智慧电力*, 2022, 50(2): 55-61. GU Tingyun, YANG Qijia, XU Meimei, et al. Fast power modulation strategy for inter-area oscillation damping improvement of DFIG[J]. *Smart Power*, 2022, 50(2): 55-61.
- [14] 许昊, 甘德强, 黄润, 等. 基于最小特征轨迹的电力系统稳定器参数整定方法[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(5): 134-143. XU Hao, GAN Deqiang, HUANG Run, et al. Parameter tuning method for power system stabilizer based on minimum characteristic locus[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(5): 134-143.
- [15] 冯鼎元, 康英伟. 计及阻尼特性与调频特性的调速侧电力系统稳定器优化策略[J]. *热力发电*, 2022, 51(6): 102-110. FENG Dingyuan, KANG Yingwei. Optimization strategy of governor side power system stabilizer considering damp characteristics and frequency regulation performance[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(6): 102-110.
- [16] 鞠平, 刘咏飞, 王红印, 等. 电力系统的广义强迫振荡[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(5): 1-6. JU Ping, LIU Yongfei, WANG Hongyin, et al. General forced oscillations of power systems[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(5): 1-6.
- [17] FENG Shuang, JIANG Ping, WU Xi. Suppression of power system forced oscillations based on PSS with proportional-resonant controller[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2017, 27(7): 2328-2340.

- [18] 王毅, 李琼林, 刘书铭, 等. 复杂电网环境下并网逆变器强迫振荡机理分析与抑制[J/OL]. 电测与仪表: 1-8 [2023-06-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220517.1138.002.html>.
WANG Yi, LI Qionglin, LIU Shuming, et al. Mechanism analysis and suppression strategy of forced oscillation for grid-connected inverter under complex grid conditions [J/OL]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023: 1-8[2023-06-06].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220517.1138.002.html>.
- [19] 徐衍会, 李真, 伍双喜. 高压直流附加控制对强迫振荡的抑制作用[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 162-167.
XU Yanhui, LI Zhen, WU Shuangxi. Mitigation effect of HVDC supplementary control on forced oscillation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(7): 162-167.
- [20] TRUDNOWSKI D J, GUTTROMSON R. A strategy for forced oscillation suppression[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(6): 4699-4708.
- [21] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3315-3325.
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(10): 3315-3325.
- [22] 石荣亮, 兰才华, 王国斌, 等. 基于有功前馈补偿的储能VSG并网有功振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 118-126.
SHI Rongliang, LAN Caihua, WANG Guobin, et al. Grid-connected active power oscillation suppression strategy of an energy storage VSG based on active power feed-forward compensation[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(14): 118-126.
- [23] YAO Fengjun, ZHAO Jinbin, LI Xiangjun, et al. RBF neural network based virtual synchronous generator control with improved frequency stability[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(6): 4014-4024.
- [24] 熊连松, 修连成, 王慧敏, 等. 储能系统抑制电网功率振荡的机理研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4373-4380.
XIONG Liansong, XIU Liancheng, WANG Huimin, et al. Mechanism of energy storage system to suppress grid power oscillations[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(20): 4373-4380.
- [25] 党杰, 石梦璇, 梁辰, 等. 基于储能控制的低频振荡抑制方法及作用机理[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 4029-4037.
DANG Jie, SHI Mengxuan, LIANG Chen, et al. LFO damping method and mechanism analysis based on energy storage system[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(12): 4029-4037.
- [26] 蒋平, 陈琼, 吴熙, 等. 利用重复控制跟踪的统一潮流控制器抑制系统强迫振荡方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 64-69, 168.
JIANG Ping, CHEN Qiong, WU Xi, et al. Suppressing method of power system forced oscillation by unified power flow controller based on repetitive control tracking[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(18): 64-69, 168.
- [27] 刘咏飞, 鞠平, 熊浩清, 等. 电力系统广义强迫振荡的内共振现象[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6003-6010.
LIU Yongfei, JU Ping, XIONG Haoqing, et al. Internal resonance in general forced oscillations of power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(23): 6003-6010.
- [28] FUKUDA S, YODA T. A novel current-tracking method for active filters based on a sinusoidal internal mode[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2001, 37(3): 888-895.
- [29] 刘斌, 谢积锦, 李俊, 等. 基于自适应比例谐振的新型并网电流控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 186-195.
LIU Bin, XIE Jijin, LI Jun, et al. Novel grid-connected current control strategies based on self-adaptive proportional-resonant[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(9): 186-195.

收稿日期: 2023-07-04; 修回日期: 2023-08-12

作者简介:

于建平(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新型电力系统稳定性分析与控制; E-mail: hhuyjp@hhu.edu.cn

余一平(1977—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统的建模与控制、新型电力系统动态安全分析。E-mail: yyiping@hhu.edu.cn

(编辑 周金梅)