

基于柔性负荷及 UPFC 的低频振荡抑制策略

张宁宇¹, 刘建坤¹, 陈静¹, 姚阳², 包宇庆², 陈培培², 周雪婷²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 随着电力系统结构日益复杂, 越来越多的区域电网逐渐实现互联。如何提高电力系统稳定性、供电可靠性成为急需解决的问题。低频振荡是随着电网互联而产生的, 给电网安全稳定运行带来了巨大的挑战。研究了大规模柔性负荷及统一潮流控制器(UPFC)相结合的协同控制策略, 抑制电力系统低频振荡。建立基于频率反馈的大规模柔性负荷控制策略, 并针对 UPFC 串联侧设计基于功率反馈附加控制策略。最后采用遗传算法对柔性负荷与 UPFC 协同控制策略的各参数进行优化, 得到最优协同控制策略。通过算例验证了该控制策略的有效性。

关键词: 柔性负荷; UPFC; 低频振荡

Low frequency oscillation suppression method based on flexible load and UPFC

ZHANG Ningyu¹, LIU Jiankun¹, CHEN Jing¹, YAO Yang², BAO Yuqing², CHEN Peipei², ZHOU Xueting²

(1. State Grid Jiangsu Electrical Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. NARI School of Electrical Engineering and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: With the increasing complexity of the power system, more and more regional power grids are connected with each other. Hence, how to improve the stability and reliability of the power system is in urgent need to be solved. Low frequency oscillation, generated from the connection of different grids, brings high challenge to the safe and stable operation of the power grids. In this paper, the collaborative control strategy of large-scale flexible load and Unified Power Flow Controller (UPFC) is studied to suppress the low-frequency oscillation of the power system. The control strategy for large-scale flexible load based on frequency feedback is established, and the additional control strategy based on active-power feedback is designed at the UPFC series side. Finally, genetic algorithm is adopted to optimize the parameters of the cooperative control strategy, so as to develop an optimal cooperative control strategy. The proposed method is validated by numerous examples.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707099).

Key words: flexible load; UPFC; low frequency oscillation

0 引言

区域互联电网为解决资源分布不均衡, 实现资源互补发挥了重要作用, 然而长距离输电使得区域间的联系变得薄弱, 容易出现低频振荡问题。系统低频振荡会导致频率、电压、功率等电气量持续振荡, 如果不加以有效控制将最终导致系统失稳、解列, 造成停电事故。

电力系统稳定器(Power System Stabilizer, PSS)是应对电力系统低频振荡的有效措施^[1-3]。PSS 一般安装于发电机的励磁调节器中, 其控制参数一般根

据振荡频率设置, 当系统环境发生变化时, 抑制效果会受到很大影响。

随着电力电子技术的发展, 柔性交流输电系统(Flexible Alternative Current Transmission Systems, FACTS)装置得到广泛的应用^[4-6], 低频振荡的研究逐渐转向了输电侧。FACTS 装置包括晶闸管控制串联补偿器(Thyristor Controlled Series Compensation, TCSC)^[7-9]、静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)^[10-12]、统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)^[13-15]等, 这些装置可以直接安装到现有的交流系统中, 不仅能够对电压、无功功率等起到控制作用, 而且能够控制潮流, 抑制系统低频振荡。

另一方面, 随着智能用电技术的发展, 柔性负荷逐渐成为电网运行控制的新手段。柔性负荷参与电网频率稳定控制得到了大量的关注^[16-18], 柔性负荷的阻尼特性也在一些文献中作了深入分析^[19]。

综合来看, 目前关于低频振荡控制策略的大部分研究集中在发电和输电侧, 柔性负荷参与低频振荡抑制的研究并不多, 更未见关于输电侧和用电侧协同抑制电力系统低频振荡的报道。本文研究柔性负荷与 UPFC 的协同控制策略, 从输电和用电侧协同抑制电力系统低频振荡。根据柔性负荷与 UPFC 的特点, 分别设计反馈控制策略, 通过构建多目标适应度函数, 采用遗传算法优化, 得到最优控制策略, 分别通过单机系统及多机系统算例验证了方法的有效性。

1 柔性负荷的控制策略

考虑到柔性负荷控制时的实时性要求, 柔性负荷可采取一种实时性较高的分层控制策略^[18], 分散控制器直接检测电力系统频率, 并根据频率的偏差做出响应, 避免通信延时对控制效果的负面影响。通过对频率的反馈控制, 达到提高阻尼振荡的效果。

参与控制的大多数柔性负荷只能控制开/关状态而无法连续调节功率大小, 其响应是离散的。这一类负荷的控制通过一个给定的频率阈值 Δf_{th} 来实现, 当频率偏差 Δf 低于 Δf_{th} 时, 控制器发出指令关闭负荷, 当 Δf 高于 Δf_{th} 时, 控制器打开负荷。

在具体控制时, 首先将负荷分为“开”状态和“关”状态两组。假设“开”状态的负荷数量为 n , 首先设定优先级顺序, 将排序后的负荷功率记为 p_1, p_2, \dots, p_n 。然后第 i 个负荷的 $\Delta f_{th(i)}$ 设定为

$$\Delta f_{th(i)} = -\frac{\sum_{k=1}^i p_k}{K_{DR}} \quad (1)$$

式中, K_{DR} 为预先设定的系数。“关”状态的负荷可采用同样的方法设定 Δf_{th} 。

通过对不同负荷设定差别化的 Δf_{th} , 其整体的调节特性如图 1 所示。柔性负荷总功率 P_{DR} 关于频率偏差量 Δf 的表达式可近似写为

$$P_{DR} = \begin{cases} -P_{DRm} & \text{if } \Delta f > \Delta f_m \\ -K_{DR} \cdot \Delta f & \text{if } -\Delta f_m \leq \Delta f \leq \Delta f_m \\ P_{DRm} & \text{if } \Delta f < -\Delta f_m \end{cases} \quad (2)$$

式中: $[-P_{DRm}, P_{DRm}]$ 为 P_{DR} 最大变化范围, 取决于当前参与控制的柔性负荷总容量; $[-\Delta f_m, \Delta f_m]$ 为控制中所考虑的 Δf 最大变化范围。系数 K_{DR} 由 P_{DRm} 和 Δf_m 共同决定, 见式(3)。

$$K_{DR} = -\frac{P_{DRm}}{\Delta f_m} \quad (3)$$

在接下来的仿真中, 柔性负荷采取式(2)和式(3)的模型。

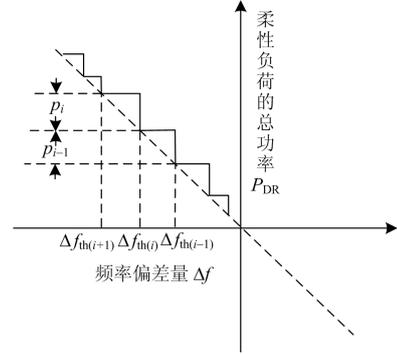


图 1 柔性负荷的整体调节特性

Fig. 1 Whole adjustment characteristic of the flexible load

2 UPFC 及柔性负荷的协同控制策略

2.1 UPFC 抑制低频振荡的控制策略

如图 2 所示, UPFC 主要由两个变流器组成, 整体结构类似于 AC-DC-AC 变换器。并联侧变流器单独工作时, 作用类似于静止无功补偿器; 串联侧变流器单独工作时, 等效于静止串联补偿器。

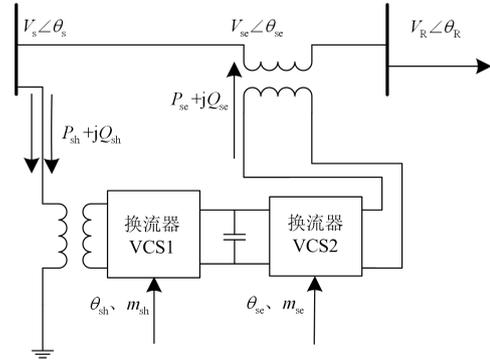


图 2 UPFC 系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of UPFC

UPFC 对电力系统线路潮流的控制主要通过串联侧来实现, 如图 3 所示。其基本原理等同于在控制线路中串联一个幅值和相角均可调节的电势 \dot{V}_{sc} , 通过改变 \dot{V}_{sc} 的幅值和相角就可以改变 UPFC 所在线路的端电压 \dot{V}_R 的幅值和相角。而串联侧的电压 \dot{V}_{sc} 又分解为与电流 I 平行的和垂直的两个分量 $V_p + jV_q$, 所以控制 V_p 、 V_q 的幅值及相角等同于实现系统的有功及无功功率调节, 从而实现对线路潮流的控制。

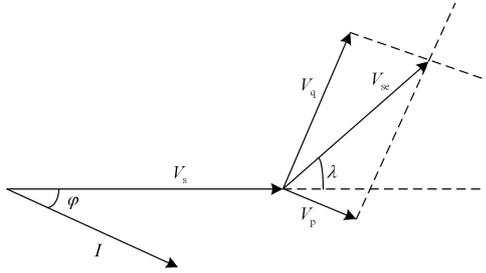


图3 串联侧综合作用相量图

Fig. 3 Comprehensive action phase diagram in the series side

如图4所示, 为了实现对低频振荡的抑制, 以线路有功功率 P_L 作为控制输入, 经过信号隔直环节、放大环节、时间超前滞后补偿环节和限幅环节后得到控制输出, 通过控制 V_p 实现对线路潮流有功分量的控制及对低频振荡的抑制。

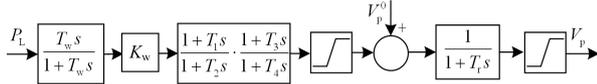


图4 UPFC 功率反馈控制结构图

Fig. 4 Power feedback control structure diagram of UPFC

2.2 计及柔性负荷及 UPFC 控制策略参数优化

在 UPFC 的控制策略中, 增益系数 K_w 和超前/滞后补偿时间常数 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 为影响低频振荡抑制效果的关键参数; 而柔性负荷的阻尼效果很大程度上由 P_{DRm} 和 Δf_m 决定。这些参数中, 假设 T_2 、 T_4 取 $0.05 \text{ s}^{[20]}$, Δf_m 取 0.5 Hz , 通过遗传算法优化其他参数。

遗传算法是一种以求解优化参数为目的的随机优化方法, 通过不断从种群中选取个体并执行选择、交叉和变异等操作, 产生新的个体, 直至达到终止条件为止。

使用遗传算法优化上述参数过程如下:

- a) 随机创建初始代 $\{K_w, T_1, T_3, P_{DRm}\}$;
- b) 使用交叉和变异操作生成子代;
- c) 对于每一组解 $\{K_w, T_1, T_3, P_{DRm}\}$, 计算适应度;
- d) 根据子代中染色体的适应度, 利用“轮盘赌”方法选择新一代个体;
- e) 重复上述过程 b)~d)。直至达到最小代数。

在计算适应度函数时, 考虑低频振荡模式的阻尼比以及参与控制的柔性负荷容量 P_{DRm} , 适应度函数建立如式(4)。

$$\min f = \lambda_1 \xi + \lambda_2 h P_{DRm} \quad (4)$$

式中: f 为适应度函数; ξ 为低频振荡模式的阻尼比; P_{DRm} 为参与控制的柔性负荷的容量; h 为柔性负荷容量的单位成本; λ_1 、 λ_2 为权重系数。

3 算例验证

在接下来的算例中, 分别基于单机无穷大系统和四机两区域系统验证控制策略的有效性。

3.1 单机无穷大系统

单机无穷大系统如图5所示。发电机装有转速和励磁控制系统, 发电机和负荷的容量分别为 $2\ 200 \text{ MW}$ 和 $2\ 000 \text{ MW}$ 。

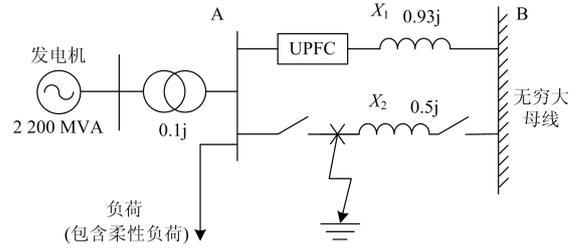


图5 单机无穷大系统模型

Fig. 5 Single machine infinite system model

K_w 和 P_{DRm} 是 UPFC 和柔性负荷的重要参数, 反映了其对低频振荡抑制的参与程度, $K_w=0$ 或 $P_{DRm}=0$ 可认为是 UPFC 或柔性负荷不参与低频振荡抑制的情形。图6给出了低频振荡模式的阻尼比与 K_w 和 P_{DRm} 的关系。从图6可以看出, 低频振荡模式的阻尼比与系数 K_w 和 P_{DRm} 有很大的关系。

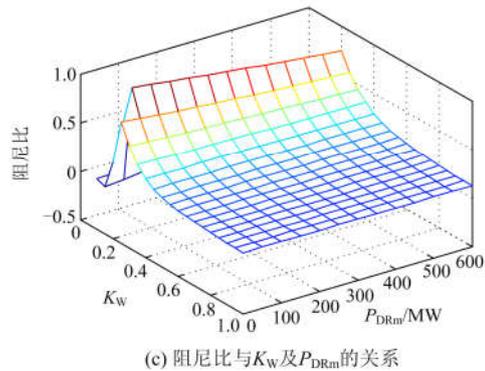
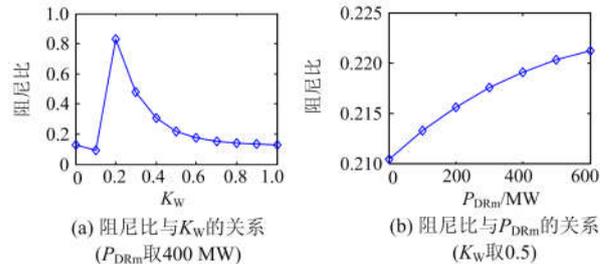


图6 单机无穷大系统低频振荡模式的阻尼比与 K_w 和 P_{DRm} 的关系

Fig. 6 Relationship between damping ratio, K_w and P_{DRm} in the low frequency oscillation mode of single infinite system

接下来通过时域仿真进一步分析柔性负荷与 UPFC 对系统稳定性的影响, 时域仿真中考虑 A 节点处发生三相短路故障(0.07 s 后故障切除)。图 7 和图 8 分别给出了 K_W 和 P_{DRm} 取不同值时, 系统的时域仿真结果, 其结果与静态稳定分析结果是一致的。

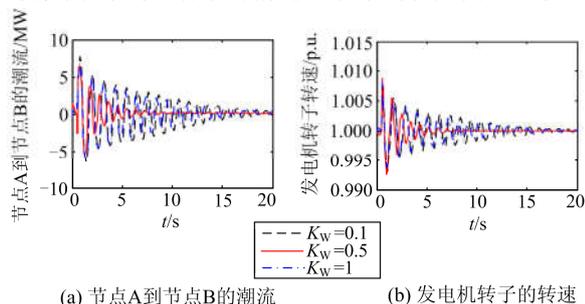


图 7 K_W 取不同值时单机无穷大系统的时域仿真结果 (P_{DRm} 取 400 MW)

Fig. 7 Time domain simulation results of the single infinite system when K_W equals to different values ($P_{DRm}=400$ MW)

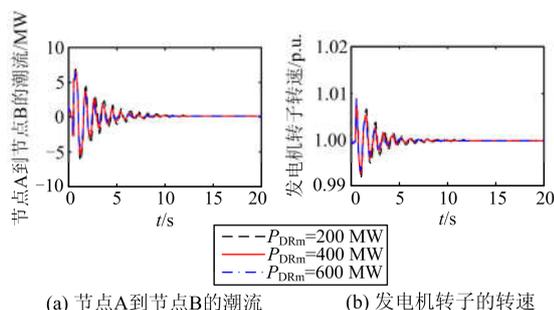


图 8 P_{DRm} 取不同值时单机无穷大系统的时域仿真结果(K_W 取 0.5)

Fig. 8 Time domain simulation results of the single infinite system when P_{DRm} equals to different values ($K_W=0.5$)

为了验证遗传算法的优化结果, 同时考虑 K_W 、 T_1 、 T_3 、 P_{DRm} 四个参数, 经过遗传算法优化, 得到最优参数: $K_W=0.27$, $T_1=0.03$ s, $T_3=0.06$ s, $P_{DRm}=175$ MW。将这些参数代入模型中进行时域仿真, 并与未优化参数的仿真结果进行比较。未优化的参数可通过试凑法得到, 这里取 $K_W=0.2$, $T_1=0.05$ s, $T_3=0.05$ s, $P_{DRm}=400$ MW。仿真结果如图 9 所示。从图 9 可以看出, 代入最优参数后, 功率振荡迅速得到平抑, 相比于未优化参数的时域仿真结果平抑速度更快, 效果更好, 从而验证了最优控制策略的有效性。

3.2 四机两区域系统

四机两区域系统如图 10 所示, 系统参数参考文献[21]。节点 7 与节点 9 分别接有 967 MW 和 1 767 MW 的负荷, 假设柔性负荷的容量 P_{DRm} 按照 1:2 的比例在节点 7 与节点 9 分配。图 11 给出了低

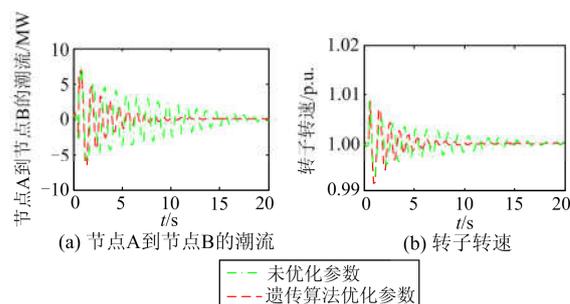


图 9 单机无穷大系统的时域仿真结果

Fig. 9 Time domain simulation results of the single infinite system

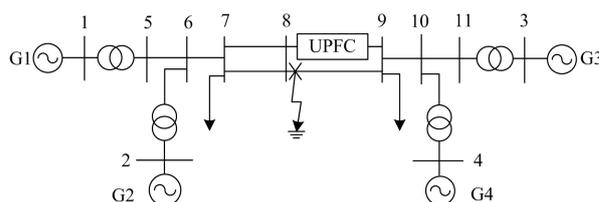
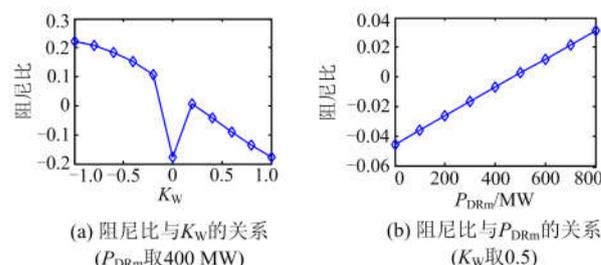


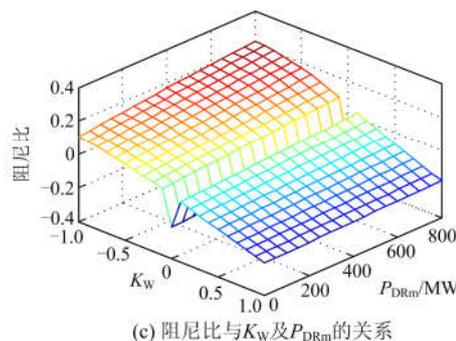
图 10 四机两区域系统模型

Fig. 10 Four-machine and two-phase region system model



(a) 阻尼比与 K_W 的关系 (P_{DRm} 取 400 MW)

(b) 阻尼比与 P_{DRm} 的关系 (K_W 取 0.5)



(c) 阻尼比与 K_W 及 P_{DRm} 的关系

图 11 四机两区域系统低频振荡模式的阻尼比与 K_W 和 P_{DRm} 的关系

Fig. 11 Relationship between damping ratio, K_W and P_{DRm} in the low frequency oscillation mode of four-machine and two-phase region system

频振荡模式的阻尼比与 K_W 和 P_{DRm} 的关系。

同时考虑 K_W 、 T_1 、 T_3 、 P_{DRm} 四个参数, 经过遗传算法优化, 得到最优参数: $K_W=-1.43$, $T_1=0.017$ s, $T_3=0.015$ s, $P_{DRm}=754$ MW。时域仿真中考虑节点 8 处发生三相短路故障(0.05 s 后故障切除)。将这些参

数代入模型中进行时域仿真，并与未优化参数的仿真结果进行比较(未优化的参数取 $K_w=-2$, $T_1=0.02$ s, $T_3=0.02$ s, $P_{DRM}=500$ MW。结果如图 12 所示。从图 12 可以看出，代入最优参数后，功率振荡能够更快地得到平抑，再一次验证了最优控制策略的有效性。

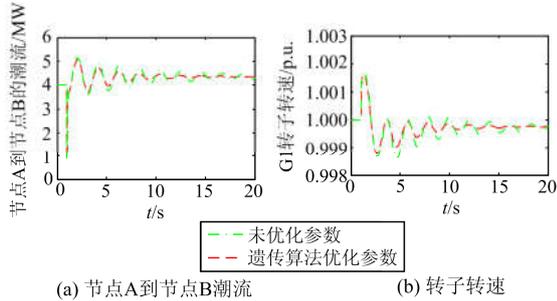


图 12 四机两区域系统的时域仿真结果

Fig. 12 Time domain simulation results of the four-machine and two-phase region system

4 结论

本文提出一种大规模柔性负荷及 UPFC 相结合的电力系统低频振荡抑制策略，取得了以下主要成果：

1) 通过反馈系统频率偏差 Δf ，设计大规模柔性负荷的控制策略，并研究了柔性负荷对阻尼低频振荡的作用。

2) 提出了柔性负荷与 UPFC 的协同控制策略，从输电和用电侧协同抑制电力系统低频振荡，通过遗传算法优化控制参数，得到最优控制策略。

本文针对柔性负荷及 UPFC 所采取的控制策略为线性反馈控制策略，在后续研究中将尝试一些非线性控制策略，以进一步提高控制系统的动态性能。

参考文献

- [1] CHEN C L, HSU Y Y. Coordinated synthesis of multimachine power system stabilizer using an efficient decentralized modal control (DMC) algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 2(3): 543-550.
- [2] 吴峰, 鲁晓帆, 陈维荣, 等. 电力系统稳定器参数优化的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 29-33.
WU Feng, LU Xiaofan, CHEN Weirong, et al. Research of parameter optimization of power system stabilizer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 29-33.
- [3] ZHANG C, KE D, SUN Y, et al. Coordinated supplementary damping control of DFIG and PSS to suppress inter-area oscillations with optimally controlled plant dynamics[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 780-791.
- [4] BARRIOS-MARTÍNEZ E, ÁNGELES-CAMACHO C. Technical comparison of FACTS controllers in parallel connection[J]. Journal of Applied Research & Technology, 2017, 15(1): 36-44.
- [5] GHORBANI A, EBRAHIMI S Y, GHORBANI M. Active power based distance protection scheme in the presence of series compensators[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 57-69. DOI: 10.1186/s41601-017-0034-4.
- [6] 常海军, 侯玉强, 柯贤波, 等. 综合 FACTS 和 HVDC 协调优化的大规模风电电网控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 78-84.
CHANG Haijun, HOU Yuqiang, KE Xianbo, et al. A method of synthesizing coordinated optimization between FACTS and HVDC for curbing large-scale wind turbine tripping[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 78-84.
- [7] CHAKRAVARTHY S K. Low frequency oscillations in a TCSC system[J]. IEEE Power Engineering Review, 1999, 19(4): 55-57.
- [8] 郑丽平, 匡洪海, 张曙云, 等. TCSC-STATCOM 控制对风电并网系统电压稳定性的改善[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 90-95.
ZHENG Liping, KUANG Honghai, ZHANG Shuyun, et al. Voltage stability improvement of wind power integrated system using TCSC-STATCOM control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 90-95.
- [9] CHEN Baoping, LIN Tao, CHEN Rusi, et al. Coordinative optimization of multi-channel PSS and TCSC damping controller to suppress the low-frequency and subsynchronous oscillation[C] // 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), July 17-21, 2016, Boston, MA, USA: 1-5.
- [10] WANG L, CHANG C H, KUANG B L, et al. Stability improvement of a two-area power system connected with an integrated onshore and offshore wind farm using a STATCOM[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(2): 867-877.
- [11] KOYAMA Y, HASEGAWA R, ARAI T, et al. One-pulse control for STATCOM with delta-connected modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 137(3): 246-255.
- [12] WANG L, CHANG C H, PROKHOROV A V. 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, OR, USA: 1-9.
- [13] THIRUMALAIIVASAN R, PRABHU N, JANAKI M, et al. Analysis of subsynchronous resonance with generalized unified power flow controller[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 53(1): 623-631.
- [14] DASH P K, PATNAIK R K, MISHRA S P. Adaptive fractional integral terminal sliding mode power control of UPFC in DFIG wind farm penetrated multimachine power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 79-92. DOI: 10.1186/s41601-018-0079-z.
- [15] 李林, 宋宗勋, 李峰, 等. 抑制区域间低频振荡的 UPFC 模糊滑模控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 104-109.
- LI Lin, SONG Zongxun, LI Feng, et al. UPFC fuzzy sliding mode controller for damping inter-area low frequency oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 104-109.
- [16] MOLINA-GARCIA A, BOUFFARD F, KIRSCHEN D S. Decentralized demand-side contribution to primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 411-419.
- [17] 包宇庆, 李扬, 王春宁, 等. 需求响应参与大规模风电接入下的电力系统频率调节研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 32-37.
- BAO Yuqing, LI Yang, WANG Chuning, et al. On demand response participating in the frequency control of the grid under high wind penetration[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 32-37.
- [18] BAO Yuqing, LI Yang, HONG Yingyi, et al. Design of a hybrid hierarchical demand response control scheme for the frequency control[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(15): 2303-2310.
- [19] HUANG H, LI F. Sensitivity analysis of load-damping characteristic in power system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1324-1335.
- [20] 张健南, 林涛, 余光正, 等. 大规模电力系统阻尼控制器协调优化方法[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2466-2472.
- ZHANG Jiannan, LIN Tao, YU Guangzheng, et al. Coordinated optimization of damping controllers in large-scale power system[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2466-2472.
- [21] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. Palo Alto, CA: EPRI, 1994.

收稿日期: 2018-06-20; 修回日期: 2018-10-08

作者简介:

张宁宇(1985—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统优化与运行;

刘建坤(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究领域为电力系统仿真分析、电力系统规划与运行等;

陈静(1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究领域为电力系统分析与控制。

(编辑 魏小丽)