

# 基于多频段电力系统稳定器的电力系统暂态稳定性优化策略

闫群民, 李玉娇

(陕西理工大学电气工程学院, 陕西省 汉中市 723001)

## Optimization Strategy of Power System Transient Stability Based on Multi-band Power System Stabilizer

YAN Qunmin, LI Yujiao

(School of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi Province, China)

**摘要:** 针对风电场接入互联系统后产生的暂态稳定性问题, 分析了低频振荡产生的原因, 提出将多频段电力系统稳定器 (multi-band power system stabilizer, MB-PSS) 与静止无功补偿器 (static var compensator, SVC) 联合运行的控制策略, 并对二者设置目标函数进行优化, 从而提高系统运行的稳定性。将风电场接入 IEEE 两区域四机互联系统, 在 MATLAB 仿真平台对 4 种工况进行了仿真验证, 结果表明所提策略在抑制区间低频振荡和稳定系统电压方面性能优越, 能有效提高电力系统的暂态稳定性和电能质量。

**关键词:** 低频振荡; 电力系统稳定器 (multi-band power system stabilizer, MB-PSS); MATLAB; 暂态稳定性; 电能质量

**Abstract:** Aiming at the transient stability problem after the wind farm is connected to the interconnection system, the causes of low-frequency oscillations were analyzed. A control strategy for multi-band power system stabilizer (MB-PSS) and static var compensator (SVC) combined operation was proposed, and the objective function was optimized to set improve the stability of system operation. The wind farm was connected to an IEEE two-region four-machine interconnected system, and the four operating conditions were simulated and verified on the MATLAB simulation platform. The results show that the proposed strategy has superior performance in suppressing interval low-frequency oscillation and stabilizing system voltage, and can effectively improve the power system Transient stability and power quality.

**Keywords:** low frequency oscillation; multi-band power system stabilizer(MB-PSS); MATLAB; transient stability; power quality

**DOI:** 10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0469

**基金项目:** 陕西省自然科学专项研究计划项目 (16JK1140)

## 0 引言

目前, 风力发电技术逐步成熟, 风电场建设规模逐渐扩大并与电力系统联网运行, 既可提高系统稳定性又能优化资源配置<sup>[1]</sup>。但由于风电场自身的电磁和机械特性, 并网后容易给系统带来诸多暂态振荡问题, 如功角失稳产生的同步振荡、轴系扭振产生的次同步振荡以及不对称负荷产生的超同步谐振<sup>[2]</sup>等, 尤其当风电接入互联系统时会产生严重的低频振荡, 给系统安全稳定运行带来极大影响。

由于发电机的励磁系统中采用的快速励磁调节器灵敏度较高, 导致系统出现负阻尼, 在电网环境薄弱时若发生扰动, 扰动会逐渐被增强, 进而引起低频振荡<sup>[3-4]</sup>。从提高电力系统稳定性以及风电机组安全运行的角度, 研究含风电场的电力系统低频振荡抑制策略, 对风电场并网的系统安全稳定运行有重要现实意义<sup>[5]</sup>。当前抑制低频振荡的主流方法是在同步机励磁系统中附加电力系统稳定器 (power system stabilizer, PSS) 来增强系统阻尼<sup>[6-7]</sup>, 对于常规电力系统低频振荡的抑制具有一定效果, 但无法有效抑制长距离输电线路中发生的区域间振荡。多频段电力系统稳定器 (multi-band power system stabilizer, MB-PSS) 与传统 PSS 相比灵敏度更高<sup>[8]</sup>, 主要特点为多频段输出, 可根据系统状态灵活选择所需频段数。文献<sup>[9]</sup>提出将 PSS 与静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM) 配合应用于电力系统中, STATCOM 能够为风电场提供无功支撑, 而

PSS可减小系统的暂态振荡，两者配合使用可有效提高系统的暂态稳定性。

MB-PSS相较于传统PSS在改善故障后振荡幅值和动态性能上具有优越性，且静止无功补偿器(static var compensator, SVC)在无功补偿装置中发展的相对成熟，大量应用于实际风电场中，具有经济性能好、可靠性高的特点。因此，为提高系统暂态稳定性，本文提出了MB-PSS与SVC联合运行来抑制区间低频振荡，同时增加系统阻尼并为系统提供无功支撑。在Matlab/Simulink仿真平台上验证了MB-PSS与SVC两者联合运行能有效抑制区间的低频振荡，同时能保证系统的电压和功率稳定。

### 1 含风电场的互联系统暂态振荡分析

将风电场接入两机互联系统，结构如图1所示。规定区域1(发电机G1的发电部分)向区域2(发电机G2的发电部分)送电，风电场并网点在区域2的联络线B<sub>2</sub>上。

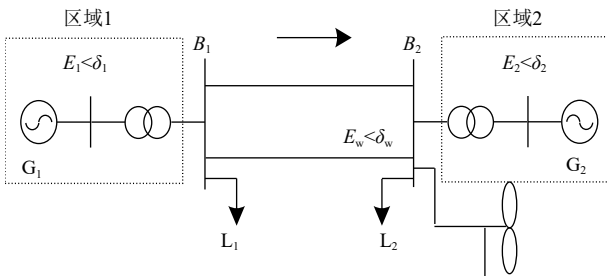


图1 风电场接入两机互联系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the wind farm connected to the two-machine interconnection system

系统在不受外界激励的条件下，由于受初始扰动造成的能量损失且位移峰值渐减的振动，称为阻尼振动。系统的状态由阻尼比 $\zeta$ 来划分。 $\zeta=0$ 的情况称为零阻尼，即此阻尼大小下系统作周期运动。本文考虑零阻尼系统并定义 $\delta_{12} = \delta_{120}$ ， $\omega_{12} = 0$ 为系统稳定平衡点，其中 $\delta_{12}$ 和 $\omega_{12}$ 为区域1和区域2间的功角差与角速度差， $\delta_{120}$ 为初始状态下两台发电机的转子相对角，则系统暂态振荡函数如下：

$$\begin{cases} V = V_k + V_p \\ V_k = \frac{1}{2} M_{eq} \omega_{12}^2 \\ V_p = \int_{\delta_{120}}^{\delta_{12}} \left[ \frac{M_{eq}}{M_1} (P_{10} + P_w - P_1) - \frac{M_{eq}}{M_2} (P_{20} + P_2) \right] d\delta_{12} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $V$ 为两区域间的暂态总振荡能量； $V_k$ 和 $V_p$ 分别为暂态振荡的动能和势能； $P_1$ 和 $P_2$ 分别为B<sub>1</sub>和B<sub>2</sub>联络线上的传输功率； $M_1$ 和 $M_2$ 分别为区域1和区域2惯性中心的惯性常数； $M_{eq}$ 为等值惯性时间常数； $P_{10}$ 和 $P_{20}$ 为G<sub>1</sub>和G<sub>2</sub>发出的有功减去负荷和网损后的有功； $P_w$ 为风电场发出的有功功率。

零阻尼情况下区域间发生低频振荡时，其转速变化量和功角变化量输出为正弦曲线，且具有同频反相的特点。对于零阻尼系统，总暂态振荡能量 $V$ 保持不变，即振荡的动能和势能之和保持不变。由式(1)可知，减小 $\omega_{12}$ 或改变 $P_w$ ，即减小两区域间的角速度差或改变风电场的输出功率，使得两区域间的暂态振荡能量 $V$ 减小，从而达到抑制低频振荡的目的。

### 2 MB-PSS与SVC优化控制策略

#### 2.1 MB-PSS基本原理

PSS是一种自动控制装置，接在励磁调节器上，可为系统提供正阻尼力矩分量来补偿系统产生的负阻尼，进而用于改善同步电机的稳定性。MB-PSS是PSS中性能较优的一种多频段电力系统稳定器<sup>[10-11]</sup>，有3个独立的频带，分别专用于低频、中频和高频振荡模式。每个频带都由差分带通滤波器、增益和限幅器3个环节构成，后将3个频带的输出相加并通过最终限制器，产生稳定器输出 $V_{stab}$ ，其原理图如图2所示。MB-PSS的特点是有多个频段，能够根据系统需求灵活选择频段数，并通过调整时间常数和频段增益达到所需频段特性，其结构图见附录图A1。

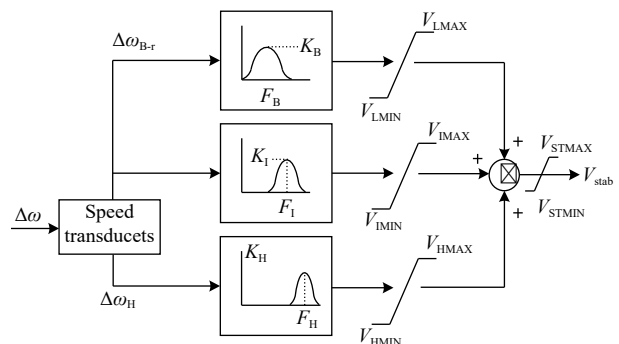


图2 MB-PSS原理图

Fig. 2 MB-PSS schematic

## 2.2 SVC 控制方式分析

SVC 是一种并联型无功补偿器件，能为系统中的风电场提供无功支撑，通过调节无功功率以达到稳定系统电压的目的。通常由若干电容器和电抗器并联组成，并由晶闸管控制。

SVC 的控制方式有恒电压和恒无功控制。两种控制方式结构相同，但控制量不同。恒电压控制下的 SVC 旨在控制端电压，通过接入外部信号使电压值恒定为 1 pu；恒无功控制下的 SVC 旨在控制无功功率，该模式下 SVC 的无功恒定为 0 var。通常风电场并网时的电压无法稳定维持在额定电压，恒电压控制下的 SVC 能使系统发生故障后较快恢复电压水平，而恒无功控制下的 SVC 可使系统以较高功率因数运行，但对于故障后系统电压恢复稳定的性能较差。

## 2.3 MB-PSS 对系统的优化控制

将 MB-PSS 安装在同步电机励磁系统中，可增加系统阻尼，减小两区域间的角速度差  $\omega_{12}$ ，从而抑制低频振荡；SVC 安装在风电场并网处可为风电场和系统提供所需无功，改变风电场有功输出  $P_w$ ，从而改变区域间传输功率，稳定系统电压。但单独接入其中一者，系统可能无法实现暂态稳定，甚至会加剧系统的不稳定性。除此之外，为了更有效地提高系统稳定性还需对 MB-PSS 与 SVC 二者的联合控制进行优化。

由李雅普诺夫稳定性定理可知，至少存在一个正实部的特征根时，系统是不稳定的；特征根实部全为负时，系统渐进稳定<sup>[12]</sup>。结合李雅普诺夫的基本思想，将用来描述电力系统动态特性的微分-代数方程线性化，可得到系统的状态矩阵  $A$ 。系统状态矩阵的特征根可用来分析系统的暂态振荡问题。 $A$  矩阵的负特征值  $\lambda$  为

$$\lambda = \sigma + j\omega \quad (2)$$

对应的系统振荡频率  $f$  为

$$f = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3)$$

由式 (2)、(3) 可得阻尼比为

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (4)$$

式中： $\xi$  为系统阻尼比； $\sigma$  为特征根实部； $\omega$  为特征根虚部。

阻尼比的大小直接影响系统发生振荡时的衰

减速度，阻尼比越大，振荡的衰减速度越快，振荡次数减少；阻尼比越小，振荡的衰减速度越慢，振荡次数增多。因此，本文以阻尼比最大、特征根实部最小为优化目标，使其满足以下约束条件：

$$\min J = \sum_{\sigma_i \leq \sigma_0} (\sigma_i - \sigma_0) + \alpha \sum_{\xi_i > \xi_0} (\xi_0 - \xi_i) \quad (5)$$

式中： $N$  为 MB-PSS 与 SVC 投入系统的个数； $\xi_i$  为第  $i$  个振荡模式的阻尼比； $\xi_0$  为设定的最小阻尼比； $\sigma_i$  为第  $i$  个特征根实部； $\sigma_0$  为设定的最大特征根实部。

此外，还应对 MB-PSS 的增益  $K_i$  和时间常数  $T_{j,i}$  进行优化，使其满足以下约束条件：

$$\begin{cases} K_{i \min} \leq K_i \leq K_{i \max} \\ T_{j,i \min} \leq T_{j,i} \leq T_{j,i \max} \end{cases} \quad (6)$$

## 3 仿真研究与分析

### 3.1 风电场接入系统模型

将风电场接入 IEEE 两区域四机系统，该系统包含 4 台容量为 900 MW 的同步发电机。风电场由 6 台 1.5 MW 的双馈风力发电机组成，母线  $B_3$  至  $B_2$  间经 35~110 kV 升压变压器并入系统，传输线路为 25 km。由风机等值原则，将该风电场等效为一台 9 MW 的双馈风机。风电场接入两区域四机系统单线图如图 3 所示。

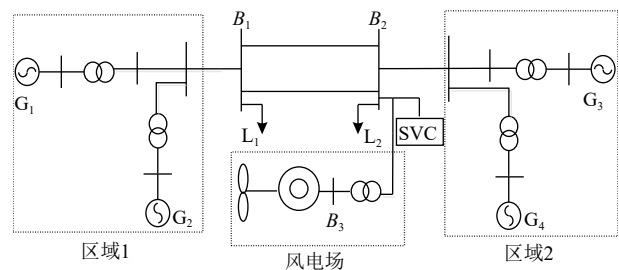


图 3 图 3 风电场接入 IEEE 两区域四机系统单线图

Fig. 3 Wind farm access IEEE two-zone four-machine system single-line diagram

### 3.2 电网暂态稳定性能仿真

为分析 MB-PSS 与 SVC 对电网暂态性能的影响，设定在 1 s 时母线  $B_1$  至  $B_2$  间联络线的单回线发生三相短路故障，故障时间为 0.2 s，在 1.2 s 时切除。风电场设置最大风速为 11 m/s，最小风



速为 4 m/s, 基本风速为 9 m/s, 仿真时间为 6 s。在 4 种工况下进行仿真实验。工况 1 为不加装 MB-PSS 和 SVC; 工况 2 为 MB-PSS 独立运行; 工况 3 为 SVC 在两种控制方式下独立运行; 工况 4 为 MB-PSS 与两种控制方式下 SVC 联合运行。本文均是对 4 台机组同时考虑配置或不配置 MB-PSS。

### 3.2.1 工况 1 与工况 2 仿真结果对比

工况 1 与工况 2 的仿真结果图即同步机角速度对比图与并网点电压波动对比图分别如图 4 和图 5 所示。区域间传输功率及风电场端电压对比图分别见附录图 A2 和图 A3。

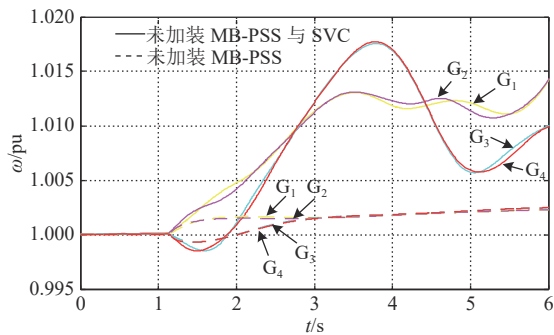


图 4 图 4 工况 1 和工况 2 下同步机角速度  
Fig. 4 Synchronous angular velocity of working condition 1 and condition 2

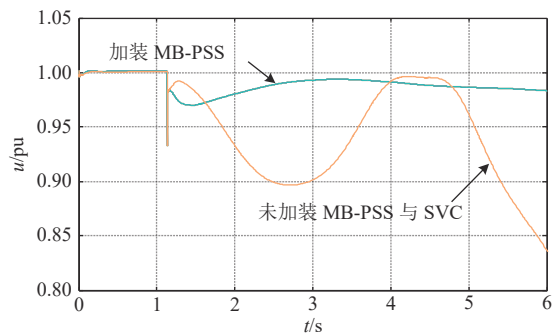


图 5 图 5 工况 1 和工况 2 风电场并网点电压波动图  
Fig. 5 Voltage fluctuation diagram of the wind farm at the grid condition of working condition 1 and condition 2

图 4 中, 各条曲线分别表示同步发电机 G1、G2、G3 和 G4 的角速度; 实线表示工况 1, 虚线表示工况 2。区域 1(G1 和 G2) 与区域 2(G3 和 G4) 间的角速度差越小越趋于稳定。由图 4 可知, 工况 1 运行时, 两区域间角速度差较大, 振荡较为剧烈, 难以在短时间内稳定; 工况 2 下运行时在 3 s 左右可以恢复稳定。由图 5 所示的并

网点电压波动对比图可知, 工况 1 在故障后其风电场并网点电压幅值波动较大, 抗扰动性差; 工况 2 在 4 s 左右趋于稳定且保持电压水平在 0.98~0.99 pu 之间。附录图 A2 为两区域间的功率传输曲线, 对比结果表明, 工况 1 在故障后波动幅值较大、振荡较为剧烈, 而工况 2 在 3 s 左右逐渐趋于稳定。由附录图 A3 可知, 工况 1 运行时, 风电场端电压在故障前电压水平较低, 故障后电压水平更低且波动明显; 工况 2 电压水平明显高于工况 1, 且有逐渐稳定的趋势。

由此可知, 工况 1 下系统暂态稳定性极差, 若不及时采取措施机组将会出现跳机情况, 而工况 2 的暂态稳定性能均优于工况 1。

### 3.2.2 工况 3 仿真结果

工况 3 下风电场并网点电压如图 6 所示, 风电场端电压波动和两区域间传输功率见附录图 A4 和 A5。

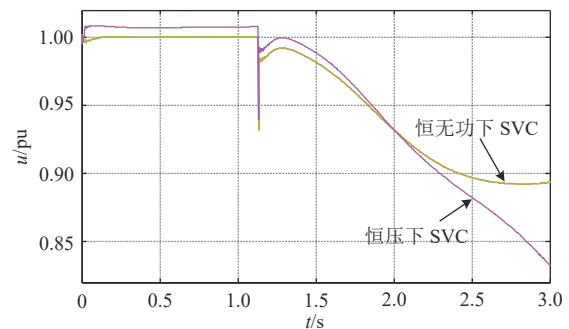


图 6 图 6 工况 3 风电场并网点电压波动图  
Fig. 6 Voltage fluctuation diagram of the wind farm at the grid point under condition 3

将图 6 与附录图 A4、A5 对比可知, 2 种控制方式在稳定电压和功率传输上有些许区别, 故障发生初期, 恒压控制下的 SVC 运行水平较高, 但后期电压跌落较大, 整体稳定性较差。恒无功控制下的 SVC 在稳定区域 1 至区域 2 间的传输功率波动方面较好。该工况下运行时, 2 种控制方式下的 SVC 阻尼特性与工况 1 几乎相同, 波动较大, 两区间转速差极不稳定, 暂态稳定性较差。因此, 工况 3 的系统暂态稳定性与工况 2 相比整体性能较低。

### 3.2.3 工况 4 仿真结果

该工况下 2 种控制方式的 SVC 与 MB-PSS 联合运行时, 其 4 台同步机组角速度输出曲线基本相同, 故本文用 MB-PSS 与恒压 SVC 的运行情

况表示工况 4 的角速度，该工况与工况 2 下的同步机角速度的对比图如图 7 所示。在该工况下，风电场并网点电压波动如图 8 所示，区域间传输功率和端电压波动图见附录图 A6 和 A7。

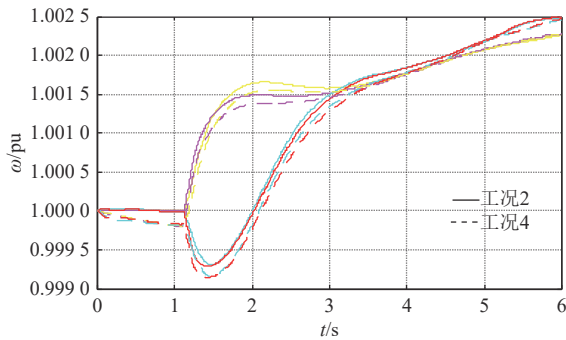


图 7 图 7 工况 4 和工况 2 同步机角速度

Fig. 7 Comparison of angular velocity of synchronous under condition 4 and condition 2

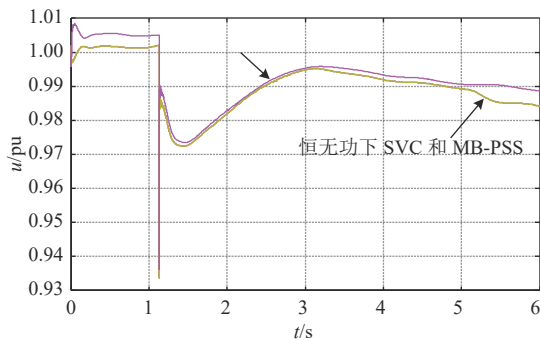


图 8 图 8 工况 4 风电场并网点电压波动图

Fig. 8 Wind farm grid point voltage fluctuation of condition 4

由图 7 可知，该工况与工况 2 相比无太大差别，均在 3 s 左右系统恢复稳定，但工况 2 在抑制电压与功率波动方面较工况 4 差。附录图 A6 显示，2 种控制方式下系统的传输功率均在 3 s 左右达到稳定，并以高水平运行。

由图 8、附录图 A7 可知，系统电压在发生故障后能迅速稳定且保持较高水平，而恒压控制下的 SVC 与 MB-PSS 联合运行在稳定系统电压方面优于恒无功控制下的 SVC 与 MB-PSS 联合运行。与其他工况相比，工况 4 中的 MB-PSS 与恒压下的 SVC 联合运行对提高系统暂态稳定性效果最佳，而将两者中的一个单独运行时无法既满足系统阻尼又满足电压和功率约束，因此将二者联合运行具有一定的实际意义。

本文从 SVC 的控制方式角度进行分析，通过

与 MB-PSS 联合运行可有效抑制低频振荡与电压和功率的波动，提高了系统的暂态稳定性能。若从设置参数角度考虑，静止无功补偿器的参数设置不合理会使系统参数不平衡，从而产生谐振和轴系扭振，导致次超同步振荡，对此，可针对该方向展开进一步研究。

## 4 结论

针对风电场所所在的区间互联系统发生故障时产生的低频振荡等系统稳定性问题，提出了将 MB-PSS 与 SVC 联合运行的策略，得到以下结论：

1) 对暂态振荡的影响因素进行分析，结果表明可减小两区域间转速差和改变风电场有功出力来抑制区间低频振荡。

2) 对 MB-PSS 原理和 SVC 两种控制方式进行分析，对二者联合运行进行优化，设置目标函数，使其满足约束条件。

3) 对所提优化控制策略(即工况 4)与其他工况进行仿真比较，结果表明所提策略能更有效抑制区间振荡，提高系统暂态稳定性。

(本刊附录请见网络版，印刷版略)

## 参考文献

- [1] 和萍, 文福拴, 薛禹胜, 等. 风电场并网对互联系统小干扰稳定及低频振荡特性的影响 [J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(22): 1-10.  
HE Ping, WEN Fuzhen, XUE Yusheng, et al. The influence of wind farm integration on small interference stability and low frequency oscillation characteristics of interconnected systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(22): 1-10 (in Chinese).
- [2] WANG L, XIE X, JIANG Q, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system [J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2015, 30(5): 2772-2779.
- [3] 关宏亮. 大规模风电场接入电力系统的小干扰稳定性研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
- [4] Tsourakis G, Nomikos B M, Vournas C D. Effect of wind parks with doubly fed asynchronous generators on small-signal stability [J]. *Electric Power Systems Research*, 2009, 79(1): 199-200.
- [5] 李辉, 陈宏文, 杨超, 等. 双馈风电场模糊附加阻尼控

- 制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 51 - 57, 6.
- LI Hui, CHEN Hongwen, YANG Chao, et al. Fuzzy additional damping control strategy for doubly-fed wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 51 - 57, 6 (in Chinese).
- [6] 王忱, 石立宝, 姚良忠, 等. 大规模双馈型风电场的小扰动稳定分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 63 - 70.
- WANG Chen, SHI Libao, YAO Liangzhong, et al. Small disturbance stability analysis of large-scale doubly-fed wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 63 - 70 (in Chinese).
- [7] 张琛, 李征, 高强, 等. 双馈风电机组的不同控制策略对轴系振荡的阻尼作用 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 135 - 144, 19.
- ZHANG Chen, LI Zheng, GAO Qiang, et al. Damping effect of different control strategies of doubly-fed wind turbines on shafting oscillations [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 135 - 144, 19 (in Chinese).
- [8] 刘英超. 基于改进PSO算法的新型电力系统稳定器PSS4B参数整定研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [9] 匡洪海, 张曙云, 曾丽琼, 等. STATCOM-PSS控制对风电并网系统稳定性和电能质量的改善 [J]. 电源学报, 2015, 13(3): 100 - 106, 133.
- KUANG Honghai, ZHANG Shuyun, ZENG Liqiong, et al. Improvement of stability and power quality of wind power grid-connected system by STATCOM-PSS control [J]. Journal of power supply, 2015, 13(3): 100 - 106, 133 (in Chinese).
- [10] Sedigh A K, Alizadeh G. Design of robust power system stabilizers(PSS) using quantitative feedback theory [C]//International Conference on Control. Coventry, UK: 1994, IEEE: 1-5.
- [11] GRONDIN R, KAMWA I, TRUDEL G, et al. Modeling and closed-loop validation of a new PSS concept, the multi-band PSS [C]//Power Engineering Society General Meeting. Toronto: 2003, IEEE: 1-6.
- [12] 周镇, 孙近文, 曾凡涛, 等. 考虑风机接入的电力系统小信号稳定优化控制 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 424 - 431.
- ZHOU Zhen, SUN Jinwen, ZENG Fantao, et al. Small signal stability optimization control of power system considering fan access [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 424 - 431 (in Chinese).

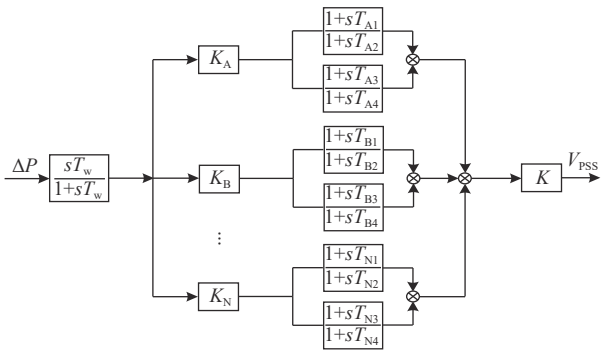
---

**收稿日期:****作者简介:**

闫群民 (1980), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与规划, E-mail: 541237261@qq.com;

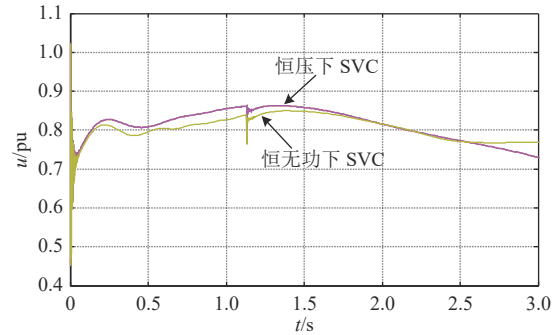
李玉娇 (1994), 女, 硕士研究生, 主要研究电力系统分析及分布式发电技术, E-mail: 798787672@qq.com。

附录 A



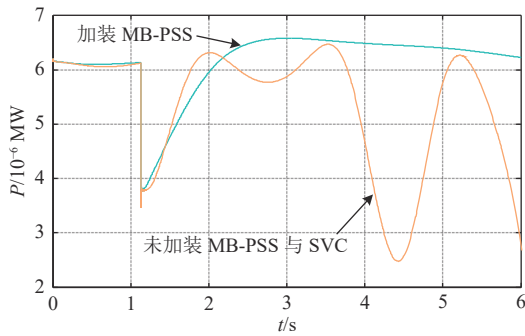
附图 A1 附录图 A1 MB-PSS 结构示意图

Fig. A1 Schematic diagram of MB-PSS structure



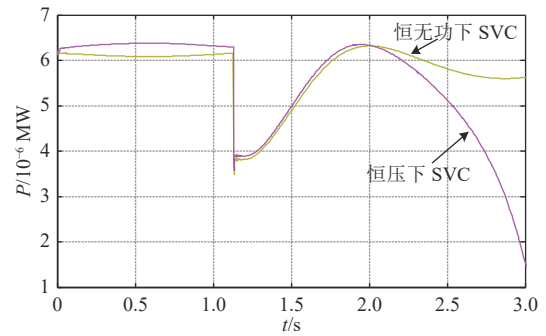
附图 A4 附录 A4 工况 3 风电场端电压波动图

Fig. A4 Wind farm terminal voltage fluctuation diagram under condition 3



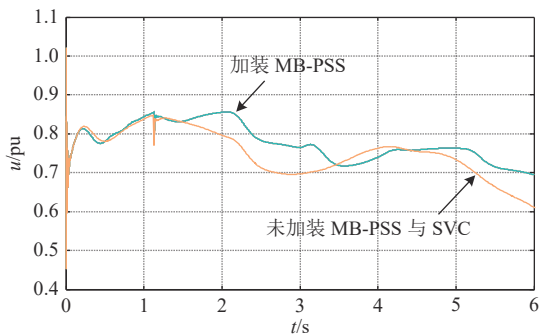
附图 A2 附录图 A2 工况 1 和工况 2 两区域间的传输功率

Fig. A2 Transmission power between two areas of working condition 1 and condition 2



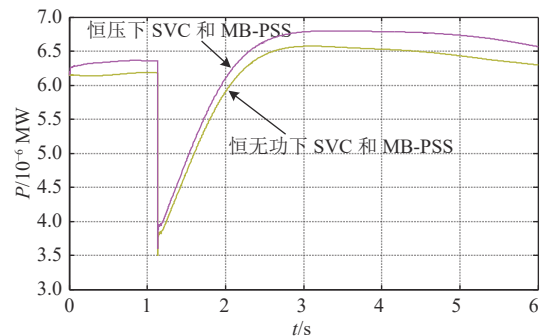
附图 A5 附录 A5 工况 3 两区域间的传输功率

Fig. A5 Transmission power between two regions of condition 3



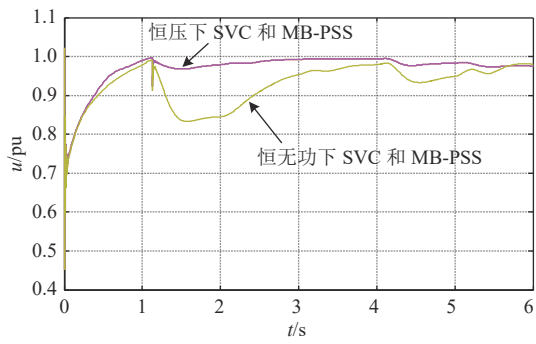
附图 A3 附录图 A3 工况 1 和工况 2 风电场端电压波动图

Fig. A3 Wind wave voltage fluctuation diagram of working condition 1 and condition 2



附图 A6 附录 A6 工况 4 两区域间的传输功率

Fig. A6 Transmission power between two areas of condition 4



附图 A7 附录 A7 工况 4 风电场端电压波动图

Fig. A7 Wind farm terminal voltage fluctuations of condition 4