

# 基于广域信息的发电机电压控制抑制区间低频振荡方法

项丽<sup>1</sup>, 鲍颜红<sup>2</sup>, 耿天翔<sup>1</sup>, 徐伟<sup>2</sup>, 摆世彬<sup>1</sup>, 杨君军<sup>2</sup>

(1. 宁夏电力公司, 宁夏 银川 750001; 2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 为了在线抑制区间低频振荡, 提出了一种基于广域信息的发电机电压控制方法。在发电机机端电压调整对系统振荡模式阻尼影响机理基础上, 分析了电压控制对局部振荡模式和区域振荡模式的影响。基于发电机主导振荡模式下参与因子计算进行控制点选取; 通过参与振荡的发电机分群计算两群机组振荡相角的均值, 判别相角均值大的机群为领先群并提升领先群机组的电压; 基于机组的调度区域属性区分局部振荡模式和区域振荡模式。南方电网算例分析结果表明, 该方法能有效抑制低频振荡, 证明了方法的正确性和有效性。

**关键词:** 低频振荡; 广域信息; 电压控制; 参与因子; 振荡模式

## Damping inter-area low frequency oscillations method for generator voltage control based on wide-area information

XIANG Li<sup>1</sup>, BAO Yanhong<sup>2</sup>, GENG Tianxiang<sup>1</sup>, XU Wei<sup>2</sup>, BAI Shibin<sup>1</sup>, YANG Junjun<sup>2</sup>

(1. Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The method of generator voltage control based on wide-area information is proposed for on-line damping low frequency oscillations. Based on the mechanism for the effect of generator voltage control on oscillation damping in power system, the effects of local and inter-area oscillation modes on voltage control are analyzed. The methods of damping low frequency oscillations, which include the selection of control points based on participation factors of the generator dominant mode, the calculation of the generators mean phase angle through separating the oscillation generators into two parts, to define the larger mean phase angle of units as advance cluster and to raise the advance cluster voltage, and the identification of local and inter-area oscillation modes based on the generator dispatching area attribute, are proved effectively and correctly by the results of China Southern power grid.

**Key words:** low frequency oscillation; wide-area information; voltage control; participation factor; oscillation mode

中图分类号: TM712

文章编号: 1674-3415(2015)18-0018-05

## 0 引言

现代电网规模庞大, 交直流输电并存, 电力市场化的推进使电网运行方式千变万化, 加之新型控制装置的大量应用以及电源种类的多样化, 其动态稳定问题日益突出, 致使低频振荡现象在系统实际运行中频繁发生, 造成机组跳闸、联络线解列等事故, 严重威胁到电力系统的安全稳定运行<sup>[1-3]</sup>。在调度运行中对于负阻尼机理振荡主要采用的措施包括:

**基金项目:** 国家电网公司科技项目“基于广域信息的大电网安全稳定在线应用关键技术研究及应用”; 宁夏电网公司科技项目“应对大电网严重故障的紧急调控技术研究”

降低相关发电机组有功出力, 以减小配出线路或系统间联络线的传输功率; 提高发电机机端电压等<sup>[4-5]</sup>。在类似南方电网的交直流混联系统中, 提升直流系统输送功率亦是经常采取的紧急调控措施<sup>[6]</sup>。

目前, 广域测量系统(WAMS)已经在绝大多数网省公司得到应用, 为广域实时量测应用于低频振荡的抑制提供了平台基础。文献[7]提出了基于WAMS的发电机出力调整紧急控制方案。文献[8]从直流线路选择、功率支援时机、支援量等方面研究了直流功率支援抑制低频振荡的关键技术。

提高振荡地区发电机机端电压对抑制低频振荡具有一定的效果。《中国南方电网电力调度管理规程》针对低频振荡的指导性处理原则包括: 发电厂、

变电站迅速采取措施提高系统电压<sup>[1]</sup>。然而目前对于发电机电压调整的作用机理和效果并不非常明晰。文献[6]认为: 由于阻尼比与电压之间存在复杂的非线性关系, 提高振荡源机端电压并不一定能提高阻尼比, 而提高振荡地区整体电压水平有利于增强电网的动态稳定性。文献[9-10]推导了特征值对 PV 节点电压的灵敏度并分析了对小干扰稳定性的影响, 结果表明通过调整 PV 节点电压可以改善系统的小干扰稳定性, 特征值对参与振荡程度较大的 PV 节点发电机电压的灵敏度较大, 但每个特征值对 PV 节点电压灵敏度的符号和大小各不相同, 不能依赖同时增加所有 PV 节点电压来改善某一模式的阻尼。

本文研究了基于广域信息的发电机电压控制抑制低频振荡方法。首先通过机理分析探讨了发电机机端电压调整对系统振荡模式阻尼的影响, 之后分析了局部振荡模式和区域振荡模式对电压控制的影响。在上述理论分析基础上, 提出采用广域信息的发电机电压控制抑制低频振荡方法, 包括基于发电机参与因子计算的控制点选取、基于扩展等面积方法(EAEC)的控制方向确定、局部振荡模式和区域振荡模式识别, 并以南方电网为例进行了验证。本文的发电机电压控制方案可为在线抑制低频振荡提供策略, 为低频振荡的实时控制提供一种有效的措施。

## 1 机端电压调整的作用

采用图 1 所示的等值两机系统分析机端电压调整对振荡模式阻尼的影响。

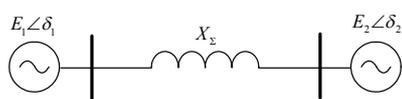


图 1 等值两机系统

Fig. 1 An equivalent two-generator power system

文献[11]定义了两机互联系统机电振荡模式的特征值对发电机转子相对角的灵敏度, 通过对灵敏度符号变化规律的推导, 获得了机电振荡模式的阻尼随转子相对角大小变化的一般规律: 当  $D_1/M_1 > D_2/M_2$  时,  $S_R = \frac{\partial \sigma}{\partial \delta_{120}} > 0$ , 机电振荡模式特征值的实部随转子相对角的增大在复平面内向虚轴方向移动, 对应着阻尼减弱。其中,  $\sigma$  为区间振荡模式特征值的实部,  $\delta_{120}$  为两机转子相对角(假定  $\delta_1 > \delta_2$ ),  $S_R$  为阻尼对转子相对角灵敏度,  $M_1$  和  $M_2$  为发电机惯性时间常数,  $D_1$  和  $D_2$  为发电机阻尼系数。

根据  $P_1 = \frac{E_1 E_2}{X_\Sigma} \sin \delta_{120}$ , 式中  $P_1$  为发电机有功出力。当内电势  $E_1$  增大时, 如果发电机有功功率不变, 则发电机转子角差  $\delta_{120}$  将减小, 由  $S_R = \frac{\partial \sigma}{\partial \delta_{120}} > 0$  可知, 两机振荡模式的阻尼将增大。

因此有以下结论: 对于近似可以等值成两机的送受端系统(一般满足  $D_1/M_1 > D_2/M_2$ ), 对于送端系统, 随着机端电压的增大, 机电振荡模式阻尼将增强; 而对于受端系统, 随机端电压的增大阻尼将减弱。

## 2 局部模式和区域模式

在大型电力系统中, 低频振荡问题可能是局部的也可能是全局性的。局部问题涉及系统的一小部分, 可能与几台临近的发电机转子之间的振荡有关。全局问题表现为一个区域里的一组发电机相对另一区域的一组发电机发生摆动的振荡。通常, 局部模式的振荡频率在 0.7~2.0 Hz 的范围内, 而区域模式的振荡频率更低。

对于局部振荡模式, 相对而言电气接线较为复杂, 联络断面和功率传送方向难以准确界定, 联络线功率方向对阻尼变化规律的影响比较复杂。同时由于振荡机组之间的电气距离较近, 电压之间交互影响作用较强, 因此, 一般情况下难以准确判断振荡机组机端电压调整的作用。

## 3 基于广域信息的控制方法

当发生低频振荡时, 基于 WAMS 的数据平台低频振荡在线分析自动触发。对发电机功角、厂站电压相角和线路功率数据预处理后, 经 Prony 算法分析得到振荡模式特征量组, 汇集提取的振荡模式特征量组, 依据能量最大原则, 识别系统的主导模式, 依据频率差和阻尼比差判断相同模式<sup>[7]</sup>。

### 3.1 机端电压控制发电机的选取

机端电压控制发电机的选取基于主导模式下机组的参与因子计算, 步骤分为四步。

第一步, 选取与低频振荡在线分析中 Prony 分析相同的观察窗口, 通过分别计算每台机组有功曲线中最大值和最小值的差值, 确定差值大于预先设置的有功波动门槛的机组集合  $GP$ ;

第二步, 对集合  $GP$  中机组的有功曲线按主导模式频率的 2 倍进行采样;

第三步, 对采样后的机组有功曲线进行 Prony 分析, 确定各机组在主导模式下的振幅和相位;

第四步,以机组振幅的平方与惯性常数比值的最大者为基准值,将机组振幅的平方与惯性常数的比值进行归一化处理,作为机组的参与因子<sup>[12]</sup>,公式为

$$\frac{|\rho_{m,k}|}{|\rho_{n,k}|} = \frac{(\Delta P_{m,k})^2 / T_{J,m}}{(\Delta P_{n,k})^2 / T_{J,n}} \quad (1)$$

其中: $\rho_{m,k}$ 为主导模式 $k$ 下 $m$ 机参与因子; $\rho_{n,k}$ 为所有 $NG$ 个参与机组中参与因子最大值, $\rho_{n,k} = \max_{i=1,NG}(\rho_{i,k})$ ; $\Delta P_{m,k}$ 为第 $k$ 个模式 $m$ 机功率偏差,可用主导模式下 $m$ 机的振幅近似表示; $T_{J,m}$ 为 $m$ 机的惯性时间常数; $\Delta P_{n,k}$ , $T_{J,n}$ 类似。

计算得到主导模式下机组的参与因子,机端电压控制发电机可选取其中参与因子较大的机组。

### 3.2 控制方向确定

针对主导振荡模式,把角度振荡幅值最大的发电机或厂站的初相角设为参考角(置为 $0^\circ$ ),依据新的初相角对发电机和厂站进行分群,在 $0^\circ$ 附近的为一群, $180^\circ$ 附近的为另一群。

文献[13]提出了基于EEAC的低频振荡抑制方法。为了避免复杂联络断面难以准确寻找的困难,采用EEAC对发电机功角振荡曲线进行分析,以减少单机无穷大(OMIB)主导映象在平衡点处的角度为目标,通过调整机组出力来提高系统的阻尼。在EEAC识别出主导模式后,将平衡点处功角超前的机群称为领前群,滞后者称为余下群。通过减少领前群的出力,增加余下群的出力,实现OMIB主导映象平衡点角度的减少。

显然,在参与振荡的发电机分群基础上,分别求取两群机组振荡周期内振荡相角的均值,也可以计算Prony分析后振荡相角直流分量的均值,判别相角均值大的机群为领前群,通过提升领前群机组的电压可以增加振荡模式的阻尼。

### 3.3 局部模式和区域模式识别

仅仅依据频率无法准确判断振荡模式为局部振荡还是区域振荡模式,基于机组的调度区域属性采用以下方法区分局部振荡模式和区域振荡模式<sup>[14]</sup>。

分别针对待分析模式集合中的每个模式,筛选出参与因子大于指定门槛值 $p_g$ 的机组集合 $G$ ,将集合 $G$ 中属于S群的机组划入集合 $G_S$ ,将集合 $G$ 中属于A群的机组划入集合 $G_A$ ,将 $G_S$ 和 $G_A$ 中的机组分别作为相应模式S群和A群的关联机组。

若待分析模式集合中的模式的频率小于等于调度区域振荡频率门槛值,则分别将包含关联机组的参与因子之和最大的调度区域作为各群的调度区域

代表,此时若两群的调度区域代表包含的关联机组的参与因子之和均大于指定门槛值 $p_{g,s}$ 且调度区域代表不同,则确认该模式为调度区域振荡模式,否则确认该模式为局部振荡模式;若待分析模式集合中的模式的频率大于等于调度区域振荡频率门槛值,则确认该模式为局部振荡模式。

## 4 算例仿真验证

本节采用电力系统安全稳定量化分析与优化决策软件(FASTEST),以南方电网为例进行仿真分析,采用小扰动稳定特征值计算的方法分析机端电压调整对系统阻尼(包括局部振荡模式和区域振荡模式)的影响,采用时域仿真的方法验证基于广域信息的发电机电压控制抑制区域内低频振荡。

### 4.1 机端电压调整对区域振荡模式的影响

分别提升小湾机组、漫湾机组、岭澳机组机端运行电压(考虑同一厂站机组电压标幺值相同),分析其对云贵-广东区间振荡模式(阻尼 $\zeta=3.764\%$ ,频率 $f=0.462\text{ Hz}$ )的影响,小湾、漫湾和岭澳机组均是该模式中参与因子较大的机组,小湾和漫湾机组位于送端云南电网,岭澳机组位于受端广东电网。计算结果如表1所示。

表1 机端电压调整对区间振荡模式的影响

Table 1 Effect of terminal voltage adjustment to the inter area oscillation mode

机端 电压/ p.u.	小湾机组		漫湾机组		岭澳机组	
	阻尼/ %	频率/ Hz	阻尼/ %	频率/ Hz	阻尼/ %	频率/ Hz
1.0	3.764 9	0.462 2	-	-	3.764 9	0.462 2
1.02	3.920 5	0.459 0	3.764 9	0.462 2	3.583 5	0.461 1
1.04	4.09	0.455 4	3.823 4	0.461 5	3.399 7	0.459 8
1.06	4.258 6	0.451 7	3.883 0	0.460 7	3.256 8	0.458 7
1.08	4.427 8	0.448 1	3.939 4	0.46	3.211 6	0.458 2

从表1可以得出,提升送端参与因子较大机组的机端电压可以提升系统阻尼,而提升受端参与因子较大机组的机端电压则恶化阻尼。

### 4.2 机端电压调整对局部振荡模式的影响

分别提升参与因子较大的大朝山机组、漫湾机组和参与因子较小的小湾机组机端运行电压,分析其对云南电网大朝山-漫湾区内振荡模式( $\zeta=3.070\%$ , $f=1.005\text{ Hz}$ )的影响,如表2所示。

从表2可以看出,对于大朝山-漫湾区内振荡模式,提高大朝山或漫湾机组的机端电压均能够改善阻尼,而小湾机组对该振荡模式几乎没有影响。

表 2 机端电压调整对云南区内振荡模式的影响

Table 2 Effect of terminal voltage adjustment on

Yunnan area oscillation mode

机端 电压/ p.u.	大朝山机组		漫湾机组		小湾机组	
	阻尼/ %	频率/ Hz	阻尼/ %	频率/ Hz	阻尼/ %	频率/ Hz
1.0	-	-	-	-	3.070 1	1.005 7
1.02	3.070 1	1.005 7	3.070 1	1.005 7	3.074 5	1.005 7
1.04	3.272 3	1.019 7	3.340 6	1.012 7	3.079 6	1.005 7
1.06	3.547 9	1.027 2	3.828 5	1.018 6	3.084 7	1.005 7
1.08	3.955 1	1.034 7	4.476 3	1.022 3	3.089 9	1.005 7

考虑某检修方式下贵州电网乌江老厂 3 号机单机对盘县机组和黔北机组的内部振荡模式( $\zeta=3.870\%$ ,  $f=1.457\text{ Hz}$ ), 提升乌江老厂 3 号机机端电压, 计算结果见表 3。从表 3 可以看出, 随着机端电压的升高, 模式阻尼反而下降。

表 3 机端电压调整对贵州区内振荡模式的影响

Table 3 Effect of terminal voltage adjustment on

Guizhou area oscillation mode

乌江老厂 3 号机机端电压/p.u.	阻尼/%
1.02	3.870 1
1.04	3.682 3
1.06	3.507 9
1.08	3.415 1

从上述算例可以看出, 局部振荡模式下振荡机组机端电压和模式阻尼关系较为复杂, 这也验证了上文分析的结论。

### 4.3 基于广域信息的发电机电压控制

在南方电网某一运行方式下, 停运部分机组 PSS, 考虑和楚甲线和平变侧三永故障, 故障后系统出现弱阻尼振荡( $\zeta=2.958\%$ ,  $f=0.531\text{ Hz}$ ), 对发电机有功曲线进行 Prony 分析得到参与因子较大的部分机组如表 4 所示。

从参与因子较大机组所属调度区域可以看出, 该振荡为云贵-广东区域振荡模式(贵州机组参与因子相对较小, 表 4 中未列出)。通过计算两群机组的相角均值, 判断云贵机组为领前群。将表 4 中参与因子较大的云南机组机端电压均提升至 1.05 p.u., 故障后阻尼得到改善( $\zeta=3.476\%$ ), 相关联络线振荡曲线对比见图 2, 其中机端电压提升后的功率曲线衰减较快。

表 4 参与因子较大的部分机组

Table 4 Part of the units with greater participation factor

发电机名	参与因子	区域	发电机名	参与因子	区域
小湾 5G	1	云南	大朝山 5G	0.412 3	云南
小湾 1G	0.998 8	云南	汕头 3G	0.396 2	广东
小湾 6G	0.996 5	云南	大亚湾 2G	0.389 8	广东
大朝山 6G	0.896 4	云南	靖海 1G	0.385 6	广东
金安桥 2G	0.867 4	云南	靖海 2G	0.384 6	广东
柘林 3G	0.522 1	广东	大朝山 2G	0.369 6	云南
柘林 4G	0.521 3	广东	大朝山 1G	0.368 9	云南
景洪 5G	0.514 5	云南	大朝山 4G	0.368 9	云南
漫湾 1G	0.434 7	云南	大朝山 3G	0.368 8	云南
柘林 2G	0.428 9	广东	滇东 1G	0.367 6	云南
柘林 1G	0.427 3	广东	滇东 2G	0.353 7	云南
海门 1G	0.416 5	广东	滇东 4G	0.353 6	云南
海门 2G	0.416	广东	滇东 3G	0.351	云南

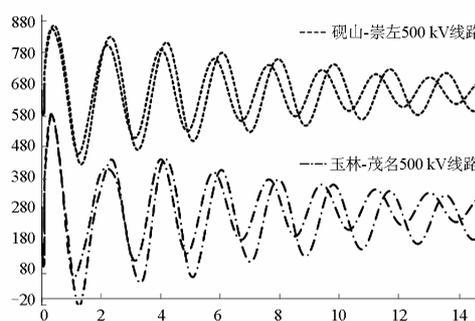


图 2 联络线振荡曲线对比

Fig. 2 Comparison of tie line oscillation curve

## 5 结论

本文对机端电压调整对低频振荡阻尼的影响进行了理论分析, 并通过算例进行了仿真验证, 在此基础上提出采用广域信息的发电机电压控制抑制低频振荡方法, 为在线抑制低频振荡提供了一种有效的措施。

## 参考文献

- [1] 石辉, 张勇军, 徐涛, 等. 我国智能电网背景下的低频振荡应对研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 242-247.
- SHI Hui, ZHANG Yongjun, XU Tao, et al. Survey of response to LFO under the background of china smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 242-247.
- [2] 郭权利. 电力系统低频振荡[J]. 电力系统保护与控制,

- 2008, 36(22): 114-119.
- GUO Quanli. Low frequency oscillation in power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 114-119.
- [3] 贾勇, 何正友. 基于受扰轨迹的低频振荡分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 140-148.
- JIA Yong, HE Zhengyou. Review on analysis methods for low frequency oscillations based on disturbed trajectories[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 140-148.
- [4] 李强, 袁越, 周海强. 浅谈电力系统低频振荡的产生机理、分析方法及抑制措施[J]. 继电器, 2005, 33(9): 78-84.
- LI Qiang, YUAN Yue, ZHOU Haiqiang. A brief review on the causes, analysis methods and restraining measures of low frequency oscillation in power system[J]. Relay, 2005, 33(9): 78-84.
- [5] 杨培宏, 刘文颖, 张继红. PSS 和 TCSC 联合抑制互联电网低频振荡[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 11-16.
- YANG Peihong, LIU Wenying, ZHANG Jihong. Restraining low frequency oscillation of interconnected power grid using PSS and TCSC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 11-16.
- [6] 梁志飞, 肖鸣, 张昆, 等. 南方电网低频振荡控制策略探讨[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 54-58.
- LIANG Zhifei, XIAO Ming, ZHANG Kun, et al. Discussion on control strategy for low frequency oscillation in China Southern Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 54-58.
- [7] 徐伟, 鲍颜红, 徐泰山, 等. 电力系统低频振荡实时控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 98-101.
- XU Wei, BAO Yanhong, XU Taishan, et al. Real-time control of power system low-frequency oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 98-101.
- [8] 鲍颜红, 王永昆, 方勇杰, 等. 基于广域测量信息和直流功率支援的低频振荡抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 118-122.
- BAO Yanhong, WANG Yongkun, FANG Yongjie, et al. DC power support for damping low frequency oscillations based on WAMS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 118-122.
- [9] 林昭华, 胡金磊, 王克文. 用特征值灵敏度法分析系统参数对小干扰稳定性的影响[J]. 继电器, 2006, 34(9): 16-20.
- LIN Shaohua, HU Jinlei, WANG Kewen. Effect of system parameter on small signal stability by eigenvalue sensitivity[J]. Relay, 2006, 34(9): 16-20.
- [10] 马林, 廖培金, 彭书涛. 小干扰稳定中特征值对运行参数的灵敏度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(4): 31-35.
- MA Lin, LIAO Peijin, PENG Shutao. Eigenvalue sensitivity with respect to operating parameters in small signal stability analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(4): 31-35.
- [11] 王青, 马世英. 电力系统区间振荡的阻尼与区域间送电功率关系特性[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 40-45.
- WANG Qing, MA Shiyong. Relationship between inter-area oscillation damping in power system and inter-area transmitted power[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 40-45.
- [12] 韩松, 徐政. 基于功率偏差估计主导区间模式下的参与因子与参与方向[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 69-74.
- HAN Song, XU Zheng. Estimation of participation factors and participation orientations for dominant inter-area mode by power deviations[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 69-74.
- [13] 郝思鹏, 薛禹胜, 张晓明, 等. 基于 EEAC 理论分析低频振荡[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 12-30.
- HAO Sipeng, XUE Yusheng, ZHANG Xiaoming, et al. Low-frequency oscillation analysis based on EEAC theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4): 12-30.
- [14] 徐伟, 庞晓艳, 徐泰山, 等. 电网振荡模式类型及关联调度区域的在线自动识别方法: 中国, CN201410006207.X[P]. 2014-01-07.

收稿日期: 2014-12-08; 修回日期: 2015-02-05

作者简介:

项丽(1977-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力调度运行管理;

鲍颜红(1971-), 男, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: baoyanhong@sgepri.sgcc.com.cn

耿天翔(1982-), 男, 高级工程师, 从事电力系统安全稳定分析及安全自动装置管理工作。

(编辑 葛艳娜)