

DOI: 10.7667/PSPC151733

# 互联电网动态稳定安控策略优化方法

张文朝<sup>1</sup>, 商显俊<sup>2</sup>, 李轶群<sup>3</sup>, 高 洵<sup>3</sup>, 顾雪平<sup>2</sup>

(1. 南京南瑞集团北京监控技术中心, 北京 102200; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院,  
河北 保定 071003; 3. 国家电网公司华北分部, 北京 100053)

**摘要:** 电网输送断面部分线路断开后, 可能引发互联电网的低频振荡问题。紧急降低送端发电机组出力是抑制振荡的有效措施, 不同机组控制的效果存在一定差异。发电机的控制系统阻尼及其接入点与受端网络之间的电气距离是影响切机效果的两个重要因素, 分别用阻尼贡献和节点电压的相角差对其进行量化, 加权后进行切机优先度排序。其中, 阻尼贡献指标将电磁力矩中的同步力矩和阻尼力矩解耦, 对阻尼力矩的作用进行了分段累加。利用华北电网实际系统进行仿真验证, 将所提方法的计算结果与现有安控策略进行对比, 证明了所提方法能够优化控制效果, 减少控制代价, 有一定的实用价值。

**关键词:** 动态稳定; 安控策略; 阻尼转矩; 力矩解耦; 电气距离

## Optimization method of security control strategy for dynamic stability in interconnected power grid

ZHANG Wenchao<sup>1</sup>, SHANG Xianjun<sup>2</sup>, LI Yiqun<sup>3</sup>, GAO Xun<sup>3</sup>, GU Xueping<sup>2</sup>

(1. NARI Group Corporation Beijing Monitoring Technology Center, Beijing 102200, China; 2. School of  
Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;  
3. North Division of State Grid Corporation, Beijing 100053, China)

**Abstract:** It may lead to low frequency oscillation in interconnected power grid if part of the lines of power transmission section is disconnected. Reducing the output of generators in sending end urgently is an effective measurement to restrain oscillation, and different control strategies may lead to different effect. The damping of generators' control system and the electrical distance from generator's access point to receiving end are the two important factors which impact the effect of cutting machine. The above factors are quantified respectively by damping contribution and phase difference of nodes' voltage in this paper, and they are weighted to priority order of cutting machine. The damping contribution accumulates the effect of damping torque segmentally by decoupling the electromagnetic torque to synchronous torque and damping torque. The actual power system of North China is used to verify the correctness of the method. By comparing the existing security control strategy with the calculation result of this proposed method, it shows that the method in this paper can optimize control performance and reduce control cost. Therefore, this method has some practical value.

**Key words:** dynamic stability; security control strategy; damping torque; torque decoupling; electrical distance

## 0 引言

由于能源资源的分布不均和用电需求的不断增长, 我国互联电网的规模逐渐增大。远距离大容量输电在实现电力资源大范围支配的同时, 也容易导致区域电网间的弱阻尼或负阻尼低频振荡。现代普遍采用的高放大倍数快速励磁系统能够有效提高系统静态和暂态稳定水平, 但是在重负荷下可能弱化系统阻尼<sup>[1]</sup>, 引发低频振荡问题。

国内外学者就互联电网低频振荡发生的机理及

控制策略进行了大量研究。文献[2]对我国多个大型联网工程的低频振荡问题进行了调研, 提出将 PSS 配置与可控串补、直流调制等措施相互配合的解决思路。文献[3]指出励磁系统中自动电压调节器的负阻尼作用是互联电网发生低频振荡的主要原因。文献[4]从阻尼转矩的角度分析了区域电网联络线阻抗与系统阻尼的关系, 证明了加强电网间的联络是解决低频振荡的根本手段。文献[5-6]研究了多机电力系统的同步转矩和阻尼转矩的计算方法, 并与模态计算相结合分析系统的动态稳定性。

文献[7-9]指出在低频振荡中,系统的总能量与振幅对应,消耗能量的元件对振荡衰减的贡献为正,具有正阻尼,而产生能量的元件是振荡源,具有负阻尼。在互联系统的低频振荡中,可能有相当数量的机组对振荡衰减的贡献为负。与局部扰动源引发的低频振荡不同,互联系统的振荡由于负阻尼机组数量较多,不能全部切除进行控制,而应该采用降低关键机组出力的方法。

工程上对于可能激发电网低频振荡的故障,会离线制定相应的安控策略,但是在切机对象的选择上主要依靠仿真曲线和经验,缺乏严格的计算分析,难以适应电网的变化发展。因此,本文提出了一种互联电网动态稳定安控策略优化方法,综合考虑了机组的控制系统阻尼及其接入点与受端电网的电气距离,按照切机优先度进行机组选择。本方法能够优化安控方案的实施效果,降低控制代价。

## 1 动态稳定控制的影响因素

### 1.1 发电机控制系统阻尼

在电网发生扰动后,发电机的 PSS、励磁绕组、阻尼绕组以及机械系统均能提供一定的正阻尼<sup>[10]</sup>,而励磁系统和调速器则有可能在一定情况下表现为负阻尼,弱化系统整体阻尼,从而导致互联系统相对振荡。

图 1 是单机无穷大系统线性化模型的传递函数框图,发电机计及了励磁系统、调速系统和 PSS 的动态。

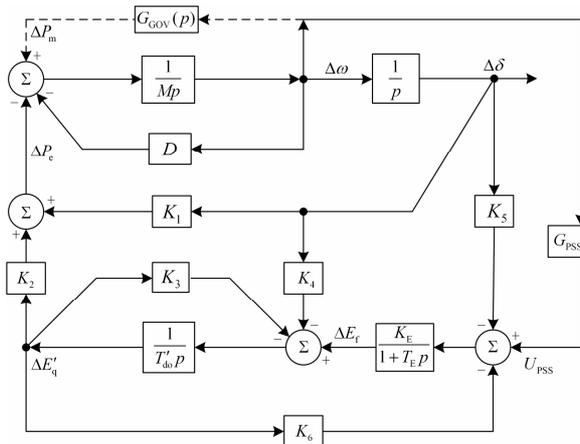


图 1 单机无穷大系统线性化模型框图

Fig. 1 Transfer function schematic of single machine infinite bus system

调速系统通过改变机械力矩影响转子运动<sup>[11]</sup>,在互联系统的低频振荡过程中,发电机的转子频率近似围绕 50 Hz 对称波动,且转速偏差幅度较小,

不会出现长时间的高频或低频,而调速器的惯性环节又将延缓机械功率的响应速度。因此,在该类低频振荡中,机械功率的变化幅度很小,其施加在转子上的阻尼转矩可以忽略不计。

发电机励磁系统通过改变电磁力矩影响转子运动。在  $\Delta\omega$  较小时,电磁力矩变化量  $\Delta T_e$  可以分解成同步力矩和阻尼力矩两个分量<sup>[12-13]</sup>,即

$$\Delta T_e = K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta E'_q = K_c \Delta\delta + D_c \Delta\omega \quad (1)$$

式中:  $\Delta\delta$  为发电机功角相对于稳态运行点  $\delta_0$  的变化量;  $\Delta\omega$  为发电机转子速度相对于稳态运行点  $\omega_0$  的变化量;  $K_c$  为电磁同步力矩系数;  $D_c$  为电磁阻尼力矩系数;  $\Delta E'_q$  为交轴暂态电动势相对与稳态运行点  $E'_{q0}$  的变化量。

同步力矩主要影响振荡频率,而阻尼力矩则与振荡的发展趋势直接相关。当  $D_c > 0$  时,电磁力矩中产生一个和速度变化量  $\Delta\omega$  同相的正阻尼力矩成分,有助于抑制低频振荡<sup>[14]</sup>。在图 1 中,参数  $K_5$  实质是机端电压对功角的偏导数,该参数在发电机重负荷(功角较大)时可能为负值。 $K_5 < 0$  时,  $\Delta T_e$  在  $\Delta\omega - \Delta\delta$  相平面上处于第 III、IV 象限,即  $D_c < 0$ ,励磁系统阻尼为负。

在联络线远距离大容量输电的情况下,送端发电机功角较大。特别是在输电断面线路跳闸后,两侧系统电气距离加大,送端发电机功角也相应加大,此时送端机组的励磁系统有可能提供负阻尼。因此,对于互联电网的低频振荡,励磁系统是导致大量送端机组阻尼恶化的主要原因。

### 1.2 发电机与受端网络的电气距离

文献[15]指出在故障后新的网络结构下,离受端系统电气距离最远的大机组一般是需要紧急降低出力的关键机组。在图 4 所示的 4 机无穷大系统中对切除近端和远端机组的控制效果进行比较。

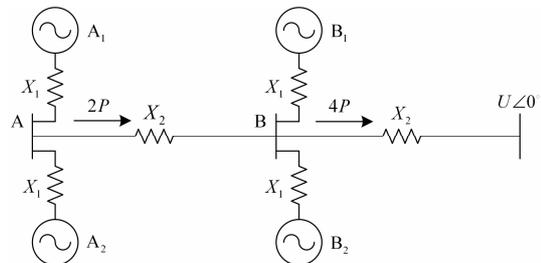


图 2 4 机无穷大系统

Fig. 2 4 machines infinite bus system

为简化分析,假设 4 台机组的控制系统参数相同,有功功率均为  $P$ ,发电机到接入点母线的等值电抗均为  $X_1$ ,两个输电断面的电抗均为  $X_2$ ,各母线

电压均为 1。切除 B<sub>1</sub> 机组时, A、B 母线的电压角度为

$$\begin{cases} \delta_B = \arcsin(3PX_2) \\ \delta_A = \arcsin(3PX_2) + \arcsin(2PX_2) \end{cases} \quad (2)$$

切除 A<sub>1</sub> 机组时, A、B 母线的电压角度为

$$\begin{cases} \delta_B = \arcsin(3PX_2) \\ \delta_A = \arcsin(3PX_2) + \arcsin(PX_2) \end{cases} \quad (3)$$

比较式(2)、式(3)可知, 切除 A<sub>1</sub> 和 B<sub>1</sub> 机组的差别在于, 切除 A<sub>1</sub> 机组能够使两个输电断面的潮流均得到降低, 从而使两个断面两侧母线电压的角度差均得到减小。由于各发电机到接入点母线的等值电抗均为  $X_1$ , 从而发电机功角与接入点母线的电压角度差值一定。因此, 切除 A<sub>1</sub> 和 B<sub>1</sub> 机组对于 B 母线所连机组的阻尼提升效果相同, 而切除 A<sub>1</sub> 机组对于 A 母线所连机组的阻尼提升效果好于切除 B<sub>1</sub> 机组。

综上, 切除远端机组能够降低多个断面的潮流, 对于其他送端机组的阻尼提升效果更大。因此, 发电机的接入点与受端电网的电气距离是影响动态稳定切机选择的另一个重要因素。

## 2 切机优先度

### 2.1 阻尼贡献指标

由以上分析可知, 发电机在低频振荡中的阻尼状态与网络的结构和参数、运行工况以及发电机控制系统参数等有关。有的机组可能在振荡中呈现正阻尼, 消耗振荡能量; 有的机组则表现为负阻尼, 提供振荡能量, 且负阻尼作用大小各异<sup>[16-18]</sup>。在机组位置相近的情况下, 切除阻尼差的机组能够获得较好的控制效果。因此, 制定安控策略需要评估各机组的阻尼贡献, 负阻尼贡献大的机组应优先切除。

图 1 中, 由于  $K_1 > 0$ , 该路径将产生与  $\Delta\delta$  同相位的分量, 只与同步转矩有关;  $K_2$  一般是大于 0 的实数, 因此  $\Delta E'_q$  同样也能分解成同步力矩和阻尼力矩叠加的形式, 即

$$\Delta E'_q = K_e \Delta\delta + D_e \Delta\omega \quad (4)$$

式(4)中的参数  $D_e$  反映了励磁绕组、励磁系统和 PSS 的综合阻尼, 由于不计调速器的阻尼作用,  $D_e \Delta\omega$  与  $\Delta\omega$  的相位关系反映了机组控制系统整体的阻尼性质。式(4)中的同步力矩分量与低频振荡无关, 将其中的同步力矩和阻尼力矩解耦, 单独对  $\Delta E'_q$  中阻尼力矩的作用进行累积计算。

定义从  $t_1$  时刻到  $t_2$  时刻发电机阻尼贡献的量化表达式为

$$DAM_i = \int_{t=t_1}^{t=t_2} (D_e \Delta\omega) \Delta\omega dt \quad (5)$$

若式(5)的计算结果为负, 则说明该机组在  $t_1$  到  $t_2$  的时间段内处于负阻尼状态, 其负数绝对值越大, 表明该机组在该振荡中越关键, 应优先考虑切除。

发电机的阻尼转矩系数难以通过简单的公式计算获得。这里根据式(3), 采用最小二乘法的矩阵形式辨识参数  $D_e$  和  $K_e$ , 实现阻尼力矩和同步力矩的解耦。在较小的振荡幅度内, 发电机的同步转矩系数和阻尼转矩系数可认为是个常数<sup>[19-20]</sup>。将振荡数据等距分段, 采用分段辨识、逐段累加的方法计算发电机阻尼贡献。以电磁阻尼力矩的计算为例, 取数据的采样间隔为 20 ms, 以相邻的 10 组  $[\Delta E'_q, \Delta\delta, \Delta\omega]$  数据为一个单位进行参数辨识。最小二乘法的矩阵形式如下:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (6)$$

式(6)中, 各矩阵内容如下所示。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 & \Delta\omega_1 \\ \Delta\delta_2 & \Delta\omega_2 \\ \vdots & \vdots \\ \Delta\delta_{10} & \Delta\omega_{10} \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \Delta E'_{q1} \\ \Delta E'_{q2} \\ \vdots \\ \Delta E'_{q10} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} K_e \\ D_e \end{bmatrix} \quad (7)$$

发电机交轴暂态电动势无法直接获得, 利用机端电压  $\dot{U}$ 、机端电流  $\dot{I}$ 、定子电阻  $R_a$ 、直轴暂态电抗  $X'_d$  和交轴同步电抗  $X_q$  进行计算, 计算公式如下。

$$\begin{cases} \dot{E}_Q = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}X_q = E_Q \angle \delta \\ \dot{E}' = \dot{U} + j\dot{I}X'_d = E' \angle \delta' \\ E'_q = E' \cos(\delta - \delta') \end{cases} \quad (8)$$

图 1 中各电气量变化量都是相对于稳态运行点而言的。在系统发生大的扰动后, 各发电机将从原来的稳态运行点振荡过渡到新的稳态运行点, 因此计算不同时刻的  $\Delta E'_q$ 、 $\Delta\delta$  和  $\Delta\omega$  应采用不同的稳态值。采集电气量在每个振荡周期的峰值和谷值, 利用三次样条差值函数拟合出振荡曲线的上、下两条包络线, 以两条包络线在同一时刻的中值作为该时刻的稳态运行点。

### 2.2 电气距离指标

电网母线电压的角度将沿着有功功率的传输方向逐渐降低, 因此, 发电机与受端电网的电气距离较远意味着其接入节点的电压相角与受端电网电压相角的差值较大。事故后与事故前的网架结构不同, 各机组与受端网络的电气距离也会发生变化, 因此, 衡量发电机接入点与受端网络的电气距离所使用的电压角度宜采用过渡过程结束后的稳态值。电气距离的指标的计算公式如式(9)。

$$DIS_i = \theta_i - \theta_{ref} \quad (9)$$

式中:  $\theta_i$  为发电机  $i$  接入节点的电压稳态角度;  $\theta_{ref}$

为受端参考发电机接入节点的电压稳态角度。

### 2.3 切机优先级

对阻尼贡献和电气距离指标进行正向化和标幺化,使其数值处于 0~1 之间。正向化计算公式为

$$\begin{cases} DAM'_i = \max(DAM_i) - DAM_i \\ DIS'_i = \max(DIS_i) - DIS_i \end{cases} \quad (10)$$

标幺化计算公式为

$$\begin{cases} DAM''_i = \frac{DAM'_i}{\max(DAM'_i)} \\ DIS''_i = \frac{DIS'_i}{\max(DIS'_i)} \end{cases} \quad (11)$$

对阻尼贡献和电气距离指标取一定的权重,加权后即发电机的切机优先级,即

$$PRI_i = a \cdot DAM''_i + (1-a) \cdot DIS''_i \quad (12)$$

式中,  $a$  为阻尼贡献指标权重。

不同电网的权重取值应该有所差别,应根据实际经验进行取值。例如:对于机组分布较为密集的送端电网,由于切除远端机组影响到的机组数量较多,电气距离指标的权重应稍大一些。

## 3 算例验证

### 3.1 阻尼贡献指标的准确性

首先对阻尼贡献指标的准确性进行验证。以华北电网为例,通过修改蒙准厂控制系统参数和电厂出线电抗来弱化厂内机组的阻尼。对蒙准厂出线设置扰动,该厂机组成为振荡源,引发蒙西电网的低频振荡。蒙准厂和部分其他电厂机组的阻尼贡献波形如图 3 所示。

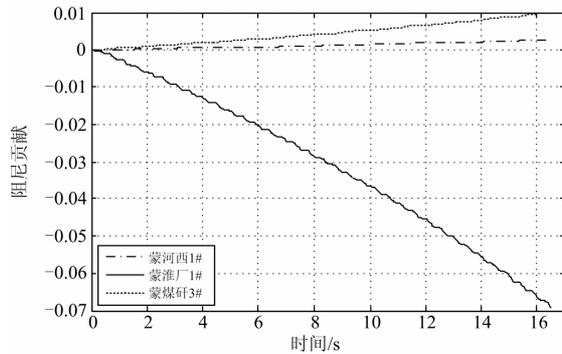


图 3 阻尼贡献波形图

Fig. 3 Waveform of damping contribution

在图 3 中,蒙准厂阻尼贡献的绝对值明显大于其他机组,其 16 s 累积的阻尼贡献达到了-0.068。其余正阻尼机组则集体消耗振荡能量,阻尼贡献的绝对值普遍较小,其中,煤研 3#机组和河西 1#机组

16 s 累积的阻尼贡献分别为 0.0095 和 0.0022。

可见,阻尼贡献指标不仅能够反映机组的阻尼性质,还能够准确量化各台机组在振荡中的重要度,明确给出需要重点控制的关键机组。

### 3.2 汗海—沽源故障

在蒙西电网外送 4250 MW 方式下,设置汗海—沽源线路 N-2,该故障将引发蒙西电网增幅振荡失稳,振荡频率为 0.313 Hz,阻尼比为-0.015。目前华北的安控方案,需切除河西电厂 1#、2#机组以及达旗电厂 5#机组,总切机量为 1530 MW。

在没有施加控制措施的情况下,计算蒙西电网能够配置安控措施的所有机组的指标,阻尼贡献和电气距离指标权重各取 0.5,计算结果如表 1 所示。

表 1 指标计算结果

Table 1 Calculation results of indexes

发电机	阻尼贡献	电气距离	切机优先级
蒙布连 1#	-0.818 6	60.8	0.818 182
蒙河西 1#	-0.566 8	56.6	0.541 128
蒙河西 2#	-0.556 3	56.6	0.537 536
蒙凤凰 2#	0.642 9	64.8	0.5
蒙磴口 1#	0.599	63.7	0.465 019
蒙京泰 1#	-0.603 4	53.8	0.426 377
蒙煤研 4#	-0.546	54.2	0.424 921
蒙准厂 1#	-0.464 3	54.1	0.392 425
蒙准厂 3#	-0.330 4	54.1	0.346 616
蒙煤研 3#	-0.301 5	54.2	0.341 275
蒙准厂 2#	-0.289 8	54.1	0.332 726
蒙达旗 6#	0.080 6	56.4	0.310 553
蒙达旗 5#	0.084	56.4	0.309 389
蒙准厂 4#	-0.152 8	54.1	0.285 857

可见,在该运行方式下,对低频振荡影响较大的 3 台机组分别是布连 1#机组、河西 1#机组和河西 2#机组。

华北现有方案实施后,低频振荡的阻尼比能够达到 0.016。按照表 1 的阻尼贡献排序逐渐增加切机量,当切机总量达到 1160 MW 功率时,振荡阻尼比即可与原方案相同。其中布连 1#机组 660 MW,河西 1#机组 500 MW,切机总量少了 370 MW,占原方案的 24.2%。原方案和改进方案实施后蒙西外送通道丰泉—万全的有功功率如图 4 所示。

由图 4 可见,原方案实施后外送断面功率平均值在 3080 MW 左右,而改进方案则为 3320 MW。因此,本方法能够优化安控策略,减少由于抑制振荡而造成的功率缺额。

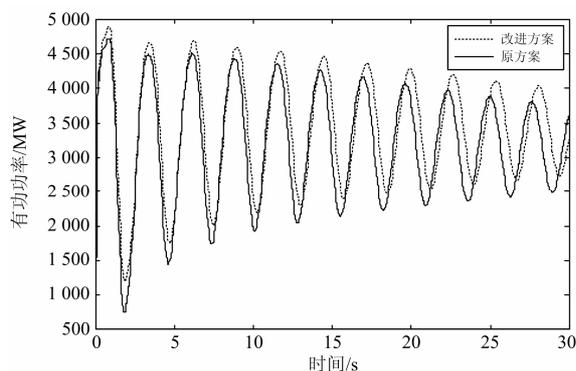


图 4 外送断面功率对比图

Fig. 4 Comparison chart of power in delivery section

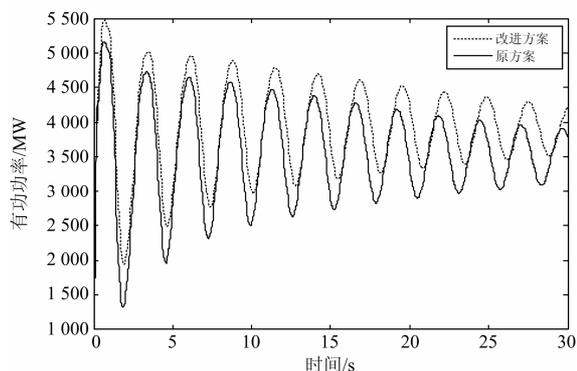


图 5 外送断面功率对比图

Fig. 5 Comparison chart of power in delivery section

### 4.3 永圣域—丰泉故障

检修永圣域—丰泉三回线中的一回, 呼丰断面(武川—察右中、旗下营—汗海和永圣域—丰泉)功率为 4724 MW。设置永圣域—丰泉另外两回线路 N-2 故障, 蒙西电网将发生增幅振荡, 振荡频率为 0.33Hz, 阻尼比为-0.0023。现有安控方案为切除河西电厂 1#机组、煤矸电厂 3#、4#机组和京泰电厂 1#机组, 总切除量为 1560 MW。

发电机指标计算结果如表 2 所示, 权重取值与上例相同。

表 2 指标计算结果  
Table 2 Calculation results of indexes

发电机	阻尼贡献	电气距离	切机优先级
蒙布连 1#	-0.637 8	55.4	0.777 778
蒙河西 1#	-0.600 3	50.9	0.482 18
蒙河西 2#	-0.596 5	50.9	0.480 374
蒙凤凰 2#	0.414 4	58.3	0.456 79
蒙煤矸 4#	-0.319	52	0.416 409
蒙磴口 1#	0.290 2	56.6	0.410 871
蒙准厂 1#	-0.297 4	51.8	0.393 799
蒙京泰 1#	-0.264 1	51.6	0.365 63
蒙准厂 2#	-0.207 7	51.8	0.351 174
蒙准厂 3#	-0.179 5	51.8	0.337 774
蒙煤矸 3#	-0.125 7	52	0.324 554
蒙达旗 6#	0.065 4	51.2	0.184 362
蒙达旗 5#	0.069 1	51.2	0.182 603

由表 2 可知, 阻尼贡献指标较大的机组是布连 1#机组、河西 1#机组和河西 2#机组。现有安控方案实施后达到的阻尼比为 0.017, 而按照阻尼贡献指标排序进行控制时, 只需切除 1060 MW 的功率即可达到同样的控制效果。其中, 布连 1#机组切除 660 MW, 河西 1#机组切除 400 MW, 切机总量减少了 500 MW, 占原方案切机总量的 32%。两种方案实施后外呼丰断面外送功率曲线如图 5 所示。

图 5 中, 原方案实施后外送断面平均功率约为 3493 MW, 改进方案则为 3890 MW, 控制代价相比原方案大幅度减少。因此, 本方法完全可以为离线方案制定提供严格的数据分析。而应用于在线振荡监测与控制时时, 本方法能更好地适应故障形式、电网参数和结构的变化, 根据实时数据给出优化的切机顺序, 最大限度提高系统阻尼。

## 4 结论

本文在电网结构、参数和运行工况等因素多变的背景下, 提出了一种互联网低频振荡安控策略的制定方法, 优化安全稳定控制效果。基于发电机控制系统负阻尼机理的分析, 提出了阻尼贡献指标, 准确量化发电机阻尼转矩的累积效应。综合考虑发电机接入点与受端电网的电气距离对安控效果的影响, 形成切机优先级指标。通过华北电网仿真对比验证, 证明了按照切机优先级指标安排安控策略, 能够减小控制代价, 获得较好的控制效果。该方法能够应用于离线方案的制定以及振荡的在线监测。

## 参考文献

[1] 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.

[2] 朱方, 汤涌, 张东霞, 等. 我国交流互联电网动态稳定性的研究及解决策略[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 1-5.  
ZHU Fang, TANG Yong, ZHANG Dongxia, et al. Study on dynamic stability problems of AC interconnected area power grids in China and their solutions[J]. Power

- System Technology, 2004, 28(15): 1-5.
- [3] 朱方, 赵红光, 刘增煌, 等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1-7.  
ZHU Fang, ZHAO Hongguang, LIU Zenghuang, et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 1-7.
- [4] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6-11.  
YU Yixin, LI Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11.
- [5] SHALTOUT A A, ABU AL-FEILAT K A. Damping and synchronizing torque computation in multi machine power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 280-286.
- [6] ABU AL-FEILAT K A, YOUNAN N, GRZYBOWSKI S. Estimating the synchronizing and damping torque coefficients using Kalman filtering[J]. Electric Power Systems Research, 1999, 52(1): 145-149.
- [7] 陈磊, 闵勇, 胡伟. 基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源定位(一)理论基础与能量流计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 22-27.  
CHEN Lei, MIN Yong, HU Wei. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy, part one: mathematical foundation and energy flow computation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 22-27.
- [8] 陈磊, 陈亦平, 闵勇. 基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源定位(二)振荡源定位方法与算例[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 1-5.  
CHEN Lei, CHEN Yiping, MIN Yong. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy, part two: method for oscillation source location and case studies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 1-5.
- [9] CHEN Lei, MIN Yong, HU Wei. An energy-based method for location of power system oscillation source[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 28(2): 828-836.
- [10] 刘蔚, 赵勇, 吴琛, 等. 一种提高小水电群送出能力的PSS参数协调优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 44-50.  
LIU Wei, ZHAO Yong, WU Chen, et al. A method of PSS parameters coordinated optimization for the improvement of transmission capacities of multiple small hydropower station groups[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 44-50.
- [11] 王官宏, 陶向宇, 李文锋, 等. 原动机调节系统对电力系统动态稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 80-86.  
WANG Guanhong, TAO Xiangyu, LI Wenfeng, et al. Influence of turbine governor on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 80-86.
- [12] 李阳海, 黄莹, 刘巨, 等. 基于阻尼转矩分析的电力系统低频振荡源定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 84-91.  
LI Yanghai, HUANG Ying, LIU Ju, et al. Power system oscillation source location based on damping torque analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 84-91.
- [13] 孙建波, 赵娴, 李大虎, 等. 利用储能抑制互联电力系统联络线功率振荡的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 10-17.  
SUN Jianbo, ZHAO Xian, LI Dahu, et al. Study on energy storage in damping tie line power oscillations in power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 10-17.
- [14] MARSHALL W K, SMOLINSKI W J. Dynamic stability determination by synchronizing and damping torque analysis[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 2007, 92(4): 1239-1246.
- [15] 杨海涛, 丁茂生, 宋新立. 电力系统动态稳定机理和稳定措施分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 25(7): 35-39.  
YANG Haitao, DING Maosheng, SONG Xinli. Analysis on power system dynamic stability mechanisms and stabilizing measures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 25(7): 35-39.

- [16] 李文锋, 郭剑波, 李莹, 等. 基于 WAMS 的电力系统功率振荡分析与振荡源定位(1)割集能量法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 41-46.  
LI Wenfeng, GUO Jianbo, LI Ying, et al. Power system oscillation analysis and oscillation source location based on WAMS, part 1: method of cutset energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 41-46.
- [17] 李文锋, 李莹, 周孝信, 等. 基于 WAMS 的电力系统功率振荡分析与振荡源定位(2)力矩分解法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 47-53.  
LI Wenfeng, LI Ying, ZHOU Xiaoxin, et al. Power system oscillation analysis and oscillation source location based on WAMS, part 2: method of torques decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 47-53.
- [18] 陈中, 王海风. 基于“区域阻尼”的互联电网阻尼分析与控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 12-16.  
CHEN Zhong, WANG Haifeng. Study of analysis and control of damping based on “area-damping” in large-scale interconnected power grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 12-16.
- [19] 贺仁睦, 沈峰, 韩冬, 等. 发电机励磁系统建模与参数辨识综述[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 62-67.  
HE Renmu, SHEN Feng, HAN Dong, et al. The study of generator excitation system modeling and parameters estimation[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 62-67.
- [20] 王茂海, 郭登峰, 江长明. 低频振荡过程中励磁系统阻尼特性分析方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 47-50.  
WANG Maohai, GUO Dengfeng, JIANG Changming. An analysis method to evaluate damping characteristics of excitation systems in low frequency oscillation process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 47-50.

---

收稿日期: 2015-09-27; 修回日期: 2015-11-09

作者简介:

张文朝(1978-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制方面的研究工作; E-mail: zhangwenchao@sgepri.sgcc.com.cn

商显俊(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统低频振荡的扰动源定位技术; E-mail: sxj\_ncepu@163.com

顾雪平(1964-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统安全稳定评估与控制、电力系统安全防御与恢复控制、智能技术在电力系统中的应用。E-mail: xpgu@ncepu.edu.cn

(编辑 张爱琴)