

# 基于广域量测数据的 电力系统自动切负荷紧急控制算法

张薇, 王晓茹, 廖国栋

(西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031)

## Automatic Load Shedding Emergency Control Algorithm of Power System Based on Wide-Area Measurement Data

ZHANG Wei, WANG Xiao-ru, LIAO Guo-dong

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** On the basis of direct method for power system frequency stability analysis, combining with wide-area measurement technology, an automatic load shedding control algorithm is proposed. In the proposed algorithm, it is not necessary to research the system parameters after the attenuation of transient process, the Jacobian matrix is calculated by directly using the wide-area measurement data at the instant after disturbance occurs, thus the steady state frequency of power system after the disturbance as well as the load shedding amount to make the steady state frequency keeping its setting value can be predicted. In the proposed algorithm the network loss variation during the disturbance and practical valve limits of prime motors is taken into account. By means of PSS/E software and WSCC 9-bus system, the simulation of the proposed algorithm is conducted. Simulation results prove that the proposed algorithm is correct.

**KEY WORDS:** power system; frequency stability; wide-area measurements system (WAMS); automatic load shedding

**摘要:** 在研究频率稳定分析直接法的基础上, 结合广域量测技术, 提出了自动切负荷控制算法。该算法不需要确定暂态衰减结束后的系统参数量, 直接利用扰动后瞬间的广域量测数据来计算雅可比矩阵, 从而预测出系统在扰动后的稳态频率以及保证系统稳态频率为整定值的切负荷量。算法计及了系统在扰动过程中的网损变化以及原动机实际阀门限制情况。利用 PSS/E 仿真软件, 针对 WSCC 9 节点系统对所提出的算法进行了仿真验证, 仿真结果证明了

所提出算法的正确性。

**关键词:** 电力系统; 频率稳定; 广域测量系统; 自动切负荷

## 0 引言

低频减载作为电力系统安全稳定控制的最后一道防线, 在国内外受到了广泛关注<sup>[1-6]</sup>。当系统或地区功率缺额严重时, 低频减载可能来不及动作, 导致系统频率崩溃, 此时需要采取自动切负荷措施<sup>[7]</sup>, 快速切除集中负荷, 改善频率稳定。有效的快速自动切负荷控制与低频减载相比, 切除负荷量较少。根据美国 WECC 南部子系统自动切负荷装置运行报告, 在扰动后达到同等系统频率恢复的情况下, 自动切负荷量比低频减载少 10%~20%<sup>[8]</sup>。

目前国内外对自动切负荷控制的研究主要是切除离线整定的负荷, 切负荷量与系统运行状态也有一定的关系<sup>[9-10]</sup>。文献[11]利用扰动前广域同步相量测量来估计系统有功缺额, 实现频率预测控制, 其中考虑了频变和压变负荷参数变化对系统频率的影响, 但忽略了扰动过程中的网损变化以及负荷切除后负荷模型参数的变化。文献[12]在文献[11]的基础上, 考虑了发电机一次调频时原动机实际阀门限制, 根据同步相量测量信息, 对负荷及网损在扰动后瞬间与扰动后稳态时刻之间的变化进行了估计。文献[13-14]利用最近一次潮流计算的雅可比矩阵因子表, 快速求得扰动后系统的稳态频率, 并将受扰系统的减载控制描述成线性规划问题, 该算法忽略了扰动后短时间内系统中发电机转子间的相对摇摆, 认为扰动后瞬间有功增量按照惯性比例

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(90610026); 四川省应用基础研究项目(2006J13-111)。

Supported by National Natural Science Foundation Major Research Projects of China (90610026).

分配,但实际上受扰系统从扰动后瞬间过渡到惯性潮流阶段需要一定的时间<sup>[15-16]</sup>。

广域测量系统(wide-area measurements system, WAMS)为电力系统的动态预警和稳定控制提供了先进的信息支持,探索和发展基于广域信息的动态安全防御体系的理论成为各国的研究热点<sup>[17-24]</sup>。本文在频率稳定分析直接法的基础上,提出一种用于自动切负荷控制的改进算法。该算法借助广域测量系统能实时提供同步动态数据的优点,克服了文献[13-14]需要计算惯性潮流来确定系统参数的缺点,利用扰动后瞬间测得的系统各母线电压、发电机功率、负荷参数等广域信息,计算雅可比矩阵,进而通过代数方程运算快速计算出系统在扰动后的稳态频率以及保证系统稳态频率为整定值所需的切负荷量。改进算法还考虑了扰动中的网损变化及原动机实际阀门限制。最后利用 PSS/E 仿真软件,应用该改进算法对 WSCC 9 节点系统进行仿真计算,取得了满意的效果。

## 1 稳态频率计算的改进直接法

### 1.1 节点功率增量方程

系统惯性中心频率 $\omega_{\text{sys}}$ 定义为<sup>[15]</sup>

$$\omega_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^n (H_i \omega_i) / \sum_{i=1}^n H_i \quad (1)$$

式中: $H_i$ 、 $\omega_i$ 分别为第*i*台发电机的惯性时间常数和角频率; $n$ 为系统中的发电机数。

系统节点注入功率方程表示为

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^m V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^m V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_i$ 、 $Q_i$ 分别为节点*i*的有功和无功注入功率; $V_i$ 、 $V_j$ 分别为节点*i*、*j*的电压幅值; $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 为节点*i*、*j*之间的互导纳; $\theta_{ij}$ 为节点*i*、*j*之间的相位角差; $m$ 为系统中的节点数。

对式(2)求增量,参照偏差方程形式表示:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\Delta P$ 、 $\Delta Q$ 为有功和无功注入功率增量; $\Delta V$ 、 $\Delta \theta$ 分别为电压幅值和相角增量; $\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}$ 与普通潮流方程中的雅可比矩阵表达式完全相同。

假定系统中的发电机与负荷不在同一母线上,

则发电机节点与负荷节点的功率方程可如下表示:

1) 发电机节点注入功率方程:

$$P_i = P_{ei} = P_{mi} - P_{ai} \quad (4)$$

$$P_{ai} = P_{mi} - P_{ei} \quad (5)$$

式中 $P_{mi}$ 、 $P_{ei}$ 和 $P_{ai}$ 分别为发电机*i*的机械功率、电磁功率和加速功率, $i=1,2,\dots,n$ 。对式(4)求增量,得到发电机节点功率增量方程:

$$\Delta P_i = \Delta P_{mi} - \Delta P_{ai} = -K_{Gi} \Delta \omega - (P_{ai\infty} - P_{ai0^+}) \quad (6)$$

$$\Delta \omega = \omega_{\infty} - \omega_{0^+} \quad (7)$$

式中: $P_{ai0^+}$ 、 $P_{ai\infty}$ 分别为发电机*i*在扰动后瞬间和扰动后稳态时刻的加速功率; $K_{Gi}$ 为发电机*i*的频率调节效应系数; $\Delta \omega$ 为频率增量; $\omega_{0^+}$ 与 $\omega_{\infty}$ 分别为扰动后瞬间以及扰动后达到稳态时的系统频率,且由于系统频率在扰动前后不会突变, $\omega_{0^+}$ 与扰动前瞬间系统频率 $\omega_0$ 相等。

扰动后稳态时刻各发电机的机械功率与电磁功率基本相等,即加速功率 $P_{ai\infty}$ 等于0,则式(6)可以进一步表示为

$$\Delta P_i = -K_{Gi} \Delta \omega + P_{ai0^+} \quad (8)$$

2) 负荷节点注入功率方程:

$$\begin{cases} P_j = -P_{lj} \\ Q_j = -Q_{lj} \end{cases} \quad (9)$$

对负荷节点功率求增量,即

$$\begin{cases} \Delta P_j = -\Delta P_{lj} \\ \Delta Q_j = -\Delta Q_{lj} \end{cases} \quad (10)$$

考虑负荷的压变及频变效应,式(10)变为

$$\begin{cases} \Delta P_j = -\frac{\partial P_{lj}}{\partial \omega} \Delta \omega - \frac{\partial P_{lj}}{\partial V_{lj}/V_{lj}} \frac{\Delta V_{lj}}{V_{lj}} \\ \Delta Q_j = -\frac{\partial Q_{lj}}{\partial \omega} \Delta \omega - \frac{\partial Q_{lj}}{\partial V_{lj}/V_{lj}} \frac{\Delta V_{lj}}{V_{lj}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{lj}$ 、 $Q_{lj}$ 分别为节点*j*负荷消耗的有功及无功功率; $V_{lj}$ 为负荷节点*j*的电压幅值; $j=n+1, n+2, \dots, m$ 。

将发电机和负荷节点的功率增量方程(8)、(11)代入式(3)中,整理可得

$$\begin{bmatrix} H_G & N_G & -K_G \\ H_L & N'_L & -\frac{\partial P_L}{\partial \omega} \\ J_L & L'_L & -\frac{\partial Q_L}{\partial \omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V_L/V_L \\ \Delta \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P_{aG0^+} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$N'_{Ljj} = N_{Ljj} - \partial P_{lj} / (\partial V_{lj} / V_{lj}) \quad (13)$$

$$L'_{Lij} = L_{Lij} - \partial Q_{ij} / (\partial V_{ij} / V_{ij}) \quad (14)$$

式中下标 G、L 分别表示发电机节点和负荷节点； $P_{aG0^+}$  表示发电机在扰动后瞬间的加速功率； $N'_L$ 、 $L'_L$  是  $N_L$ 、 $L_L$  中的第  $j$  行第  $j$  列元素减去负荷节点  $j$  的负荷压变效应后得到的矩阵，即除了第  $j$  行第  $j$  列元素外，其余元素的表达式都与  $N_L$ 、 $L_L$  相同。

求解式(12)，可得到频率增量  $\Delta\omega$ ，根据式(7)可以计算出系统在扰动后的稳态频率：

$$\omega_\infty = \Delta\omega + \omega_{0^+} \quad (15)$$

## 1.2 考虑原动机实际阀门限制

发电机在调节机械功率输出时有可能已经满载，以致其调速器受负荷限制器的限制不能再参加调整<sup>[25]</sup>。发电机  $i$  在达到其最大有功输出  $P_{\max i}$  时对应一个最低频率  $\omega_{\min i}$ ，即

$$\omega_{\min i} = \omega_{0^+} - \frac{P_{\max i} - P_{mi0^+}}{K_{Gi}} = \omega_{0^+} - \frac{\Delta P_{\max i}}{K_{Gi}} \quad (16)$$

计及原动机阀门限制时，系统扰动后稳态频率的具体计算流程如下：

1) 测量扰动后瞬间的系统参数，包括母线电压幅值及相角、发电机角速度及功率、线路参数及负荷参数等，并计算出此刻系统惯性中心频率  $\omega_{0^+}$ 。

2) 根据式(16)计算出各发电机的最低频率，并由小到大排序(序列号用符号  $s$  表示)。

3) 根据式(12)计算出所有发电机在参与一次调频时均未达到其原动机最大阀门限制情况下的系统稳态频率  $\omega_\infty$ 。

4) 将  $\omega_\infty$  与排序最低( $s=1$ )的最小频率  $\omega_{\min 1}$  比较：若  $\omega_\infty \geq \omega_{\min 1}$ ，表示所有原动机均未超过其最大阀门限制，稳态频率计算结束；若  $\omega_\infty < \omega_{\min 1}$ ，表明相应发电机已经满载，不能再参与一次调频，需要修正节点功率增量方程，转至步骤 5)。

5) 假如是第  $i$  台发电机达到其最大有功输出，则  $K_{Gi} = 0$ ，发电机节点功率增量方程修改为

$$\Delta P_i = \Delta P_{\max i} + P_{ai0^+} \quad (17)$$

而负荷节点功率增量方程保持不变，用矩阵方程形式表示为

$$\begin{bmatrix} H_G & N_G & A \\ H_L & N'_L & -\frac{\partial P_L}{\partial \omega} \\ J_L & L'_L & -\frac{\partial Q_L}{\partial \omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V_L / V_L \\ \Delta \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P_{aG0^+} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -K_{G1} \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ -K_{Gn} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -\Delta P_{\max i} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

求解式(18)，计算修正后的稳态频率  $\omega_\infty$ 。

6) 令  $s = s + 1$ ，若  $\omega_\infty < \omega_{\min s}$ ，说明计算中仍出现原动机的机械功率超出其最大有功，返回步骤 5)；若  $\omega_\infty \geq \omega_{\min s}$ ，表明计算中已经考虑所有原动机实际阀门限制情况，稳态频率计算结束。

## 2 自动切负荷控制算法

计及切负荷控制对负荷节点功率增量方程的影响，修正式(10)，可得

$$\begin{cases} \Delta P_j = -\Delta(P_{lj} - P_{slj}) + P_{slj} \\ \Delta Q_j = -\Delta(Q_{lj} - Q_{slj}) + Q_{slj} \end{cases} \quad (19)$$

式中  $P_{slj}$ 、 $Q_{slj}$  分别表示负荷节点  $j$  上切除的有功及无功负荷量。若忽略切除负荷的压变效应  $\frac{\partial P_{slj}}{\partial V_j / V_j}$

以及  $\frac{\partial Q_{slj}}{\partial V_j / V_j}$ ，式(19)可表示为

$$\begin{cases} \Delta P_j = -\frac{\partial P_{lj}}{\partial V_j / V_j} \frac{\Delta V_j}{V_j} - \left( \frac{\partial P_{lj}}{\partial \omega} - \frac{\partial P_{slj}}{\partial \omega} \right) \Delta \omega + P_{slj} \\ \Delta Q_j = -\frac{\partial Q_{lj}}{\partial V_j / V_j} \frac{\Delta V_j}{V_j} - \left( \frac{\partial Q_{lj}}{\partial \omega} - \frac{\partial Q_{slj}}{\partial \omega} \right) \Delta \omega + Q_{slj} \end{cases} \quad (20)$$

减载控制对发电机节点功率增量方程没有影响，仍为式(8)。结合式(8)、(20)，用矩阵形式表示为式(21)，式中雅可比矩阵因子的表达式与式(12)相同。

$$\begin{bmatrix} H_G & N_G & -K_G \\ H_L & N'_L & -\left( \frac{\partial P_L}{\partial \omega} - \frac{\partial P_{SL}}{\partial \omega} \right) \\ J_L & L'_L & -\left( \frac{\partial Q_L}{\partial \omega} - \frac{\partial Q_{SL}}{\partial \omega} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V_L / V_L \\ \Delta \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P_{aG0^+} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ P_{SL} \\ Q_{SL} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中  $P_{SL}$ 、 $Q_{SL}$  分别为负荷节点切除的有功、无功负荷量。

假定减载前后负荷无功与有功的比例系数  $\lambda_j$  保持不变<sup>[26]</sup>：

$$\lambda_j = Q_{lj} / P_{lj} \quad (22)$$

$$Q_{slj} = \lambda_j P_{slj} \quad (23)$$

将式(22)、(23)代入功率增量方程式(21)中，并求解方程，整理可得

$$\Delta\omega = k - \sum_{j=n+1}^m c_j P_{slj} \quad (24)$$

式中  $k$ 、 $c_j$  分别为矩阵  $M$  和  $R$  的最后一行：

$$M = \begin{bmatrix} H_G & N_G & -K_G \\ H_L & N'_L & -(\frac{\partial P_L}{\partial \omega} - \frac{\partial P_{SL}}{\partial \omega}) \\ J_L & L'_L & -(\frac{\partial Q_L}{\partial \omega} - \frac{\partial Q_{SL}}{\partial \omega}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -P_{aG0^+} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$R = \begin{bmatrix} H_G & N_G & -K_G \\ H_L & N'_L & -(\frac{\partial P_L}{\partial \omega} - \frac{\partial P_{SL}}{\partial \omega}) \\ J_L & L'_L & -(\frac{\partial Q_L}{\partial \omega} - \frac{\partial Q_{SL}}{\partial \omega}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \lambda_j \end{bmatrix} \quad (26)$$

自动切负荷控制的目的是使系统扰动后的稳态频率能达到整定值，同时满足切负荷量最小的要求。因此将自动切负荷总量最小作为优化目标函数，采用线性规划方法计算优化的切负荷量：

$$\min f(P_{slj}) = \sum_{j=n+1}^m P_{slj} \quad (27)$$

$$\sum_{j=n+1}^m c_j P_{slj} = k - \Delta\omega \quad (28)$$

$$0 \leq P_{slj} \leq P_{lj\max} \quad (29)$$

$$\Delta\omega = \omega_{\text{set}} - \omega_{0^+} \quad (30)$$

式中  $\omega_{\text{set}}$  为系统扰动后稳态频率的整定值。

### 3 算例分析

#### 3.1 仿真系统

将本文提出的扰动后稳态频率计算和自动切负荷控制算法用于 WSCC 9 节点系统，利用 PSS/E 机电暂态仿真软件进行仿真计算。WSCC 9 节点系统如图 1 所示：母线 1 是平衡母线，系统负荷分别在母线 5、6、8 上，且都是恒阻抗负荷，因此只有压变效应没有频变效应。

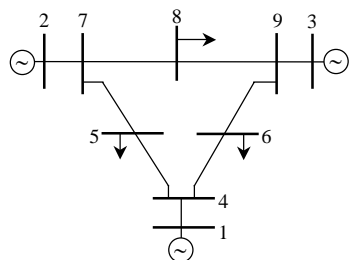


图 1 WSCC 9 节点系统  
Fig. 1 WSCC 9-bus system

#### 3.2 仿真概述

具体仿真过程如下：0 s 时刻线路 7-5 在母线 7

端口处发生三相短路故障，为清除故障，在 0.083 s 时切除故障线路，由此可能会造成系统暂态失稳，考虑在 0.125 s 切除发电机。

分别仿真了 2 种切机方案：切 2 号机和切 3 号机，其有功额定容量分别为 192 MW、128 MW，占系统总额定容量的 33.83% 和 22.56%，切机扰动后瞬间系统惯性中心频率分别为 60.048 Hz、60.144 Hz。

由于切 2 号机会造成较大的有功缺额，因此考虑采用自动切负荷控制进行切机连锁切负荷操作，使扰动后的稳态频率迅速达到整定值。利用 Matlab 工具箱中的改进单纯形法对式(27)~(29)进行优化。

#### 3.3 仿真结果

分别计算 2 种切机扰动后的系统稳态频率，与 PSS/E 仿真得到的稳态频率比较，结果如表 1 所示。

表 1 切机后系统稳态频率比较  
Tab. 1 Results comparison for steady-state frequency after dropping machine

切机方案	PSS/E 仿真结果/Hz	稳态频率计算结果/Hz	相对误差/%
切 2 号机	58.81	58.73	0.136
切 3 号机	59.36	59.35	0.016 8

由表 1 可以看出，计算出的稳态频率与实际仿真得到的结果很接近。根据稳态频率计算的改进直接法，预测计算出切 2 号机后的系统稳态频率为 58.73 Hz，若整定系统频率为 59.5 Hz，利用自动切负荷控制算法确定的切负荷量如表 2 所示。

表 2 切除 2 号机后的自动切负荷控制量  
Tab. 2 Amount of automatic load shedding after dropping machine 2

参数	负荷 5	负荷 6	负荷 8
切电导/pu	0	0.877 7	0.016 95
切电纳/pu	0	-0.292 6	-0.005 93

PSS/E 仿真得到 WSCC 9 节点系统在 0.15 s 自动切负荷后的系统稳态频率恢复至 59.495 Hz，与整定值 59.5 Hz 相比，相对误差为 0.008 4%，结果精确。

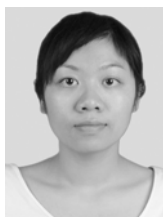
### 4 结论

本文在频率稳定分析直接法的基础上，利用 WAMS 系统测得的扰动后瞬间的系统广域信息，提出了自动切负荷控制的改进算法。改进算法考虑了扰动中的网损变化及原动机实际阀门限制，不需要逐步积分，能快速计算出系统在扰动后的稳态频率以及保证稳态频率为整定值所需的切负荷量。仿真结果表明，所提出的算法具有较高的精度，可用于电力系统频率安全稳定分析和控制，但还需在算法的实时性方面作进一步研究。

#### 参考文献

[1] 王葵,潘贞存.一种新型低频减载方案的研究[J].电网技术,2001,

- 25(12): 31-33.  
Wang Kui, Pan Zhencun. A new load shedding scheme for limiting underfrequency[J]. Power System Technology, 2001, 25(12): 31-33(in Chinese).
- [2] 熊小伏, 周永忠, 周家启. 计及负荷频率特性的低频减载方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 48-51.  
Xiong Xiaofu, Zhou Yongzhong, Zhou Jiaqi. Study of underfrequency load shedding scheme based on load frequency characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 48-51(in Chinese).
- [3] Anderson P M, Mirheydar M. An adaptive method for setting underfrequency load shedding relays[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2): 647-655.
- [4] Terzija V V. Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1260-1266.
- [5] 刘朝章, 姜云, 张源森. 基于调度自动化系统实现低频减负荷方案的探讨[J]. 电网技术, 2007, 31(增刊2): 139-142.  
Liu Chaozhang, Jiang Yun, Zhang Yuansen. Probe into the under-frequency load shedding scheme based on the dispatching automation system[J]. Power System Technology, 2007, 31(S2): 139-142(in Chinese).
- [6] 秦明亮, 杨秀朝. 减少低频减载方案过切的措施研究[J]. 电网技术, 2002, 26(3): 83-86.  
Qin Mingliang, Yang Xiuchao. Measures to reduce over-shedding caused by under-frequency load shedding project[J]. Power System Technology, 2002, 26(3): 83-86(in Chinese).
- [7] 袁季修. 防止电力系统频率崩溃的紧急控制[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(4): 1-4.  
Yuan Jixiu. Emergency control for preventing frequency collapse of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(4): 1-4(in Chinese).
- [8] WECC Southern island load tripping plan[EB/OL]. <http://www.wecc.biz/documents/politicy>, 1997.
- [9] 余志文, 白雪峰, 郭志忠, 等. 大容量远距离输电网络暂态稳定控制方法的探讨[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 57-60.  
Yu Zhiwen, Bai Xuefeng, Guo Zhizhong, et al. Probe on the transient stability control method for heavily stressed transmission network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 57-60(in Chinese).
- [10] Karlson D H. System protection schemes in power networks[C]. CIGRE, 2000.
- [11] Larsson M, Christian R. Predictive frequency stability control based on wide-area phasor measurements[C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, United States, 2002.
- [12] Thorp J S, Wang X R, Hopkinson K M, et al. Agent technology applied to the protection of power systems, Chapter 7 of the Book: autonomous systems and intelligent agents in power system control and operation[M]. Berlin: Springer, 2003: 115-154.
- [13] 李秀卿, 蔡泽祥. 电力系统低频减载控制优化算法[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(10): 23-25.  
Li Xiuqing, Cai Zexiang. An optimal algorithm of underfrequency load shedding in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(10): 23-25(in Chinese).
- [14] 蔡泽祥, 徐志勇, 申洪. 电力系统频率稳定分析的直接法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(5-6): 13-17.  
Cai Zexiang, Xu Zhiyong, Shen Hong. A direct method for frequency stability analysis of power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1999, 11(5-6): 13-17(in Chinese).
- [15] Anderson P M, Fouad A A. Power system control and stability[M]. Piscataway: IEEE Press Wiley-Interscience, 2003: 53-80.
- [16] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 周孝信, 李兴源, 周波等, 译. 北京: 中国电力出版社, 2002: 573-589.
- [17] 徐兴伟, 穆钢, 王文, 等. 基于 SCADA 和 WAMS 的电网仿真运行方式[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 97-100.  
Xu Xingwei, Mu Gang, Wang Wen, et al. Simulation operation mode of power grid based on SCADA and WAMS[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 97-100(in Chinese).
- [18] 常乃超, 兰洲, 甘德强, 等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 46-52.  
Chang Naichao, Lan Zhou, Gan Deqiang, et al. A survey on applications of wide-area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 46-52(in Chinese).
- [19] 宋方方, 毕天姝, 杨奇逊. 基于广域测量系统的电力系统多摆稳定性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 38-45.  
Song Fangfang, Bi Tianshu, Yang Qixun. Study on WAMS based multi-swing stability assessment for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 38-45(in Chinese).
- [20] 毛安家, 郭志忠, 张学松. 一种基于广域测量系统过程量测数据的快速暂态稳定预估方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 38-43.  
Mao Anjia, Guo Zhizhong, Zhang Xuesong. A fast transient stability predicting method based on the WAMS process measurement data[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 38-43(in Chinese).
- [21] 徐慧明, 毕天姝, 黄少锋, 等. 基于广域同步测量系统的预防连锁跳闸控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 32-38.  
Xu Huiming, Bi Tianshu, Huang Shaofeng, et al. Study on wide area measurement system based control strategy to prevent cascading trips[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 32-38(in Chinese).
- [22] 鞠平, 谢欢, 孟远景, 等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 56-60.  
Ju Ping, Xie Huan, Meng Yuanjing, et al. Online identification of low-frequency oscillations based on wide-area measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 56-60(in Chinese).
- [23] 徐兴伟, 穆钢, 王文, 等. 东北电网广域动态测量系统[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 70-73.  
Xu Xingwei, Mu Gang, Wang Wen, et al. Wide area dynamic measuring system of northeast power grid[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 70-73(in Chinese).
- [24] 张保会, 谢欢, 于广亮, 等. 基于广域轨迹信息的多机系统暂态不稳定性快速预测方法[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 53-58.  
Zhang Baohui, Xie Huan, Yu Guangliang, et al. Fast prediction method for multi-machine system transient instability based on wide area trajectory information[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 53-58(in Chinese).
- [25] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995: 226-231.
- [26] 冯庆东. 电力系统频率稳定性分析与控制[D]. 吉林: 东北电力学院, 1996.



张薇

收稿日期: 2008-05-06.

作者简介:

张薇(1981—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定控制, E-mail: snzw\_922@163.com;

王晓茹(1962—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护和安全稳定控制、变电站自动化技术方面的教学与研究工作;

廖国栋(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定控制。

(责任编辑 沈杰)