

交直流系统中低频减载与负荷恢复的静态优化算法

李生虎, 贾树森, 孙莎莎

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽省 合肥市 230009)

A Static Optimization Algorithm of Underfrequency Load Shedding and Load Recovery for AC/DC Power Systems

LI Shenghu, JIA Shusen, SUN Shasha

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui Province, China)

ABSTRACT: Frequency control under active power shortage relates to the fast response of underfrequency load shedding and the relatively slow response of governor, so both responses should be considered in the static load shedding algorithm simultaneously. In the incipient stage of load shedding the recovery speed of frequency is slow because the load shedding amount is smaller. According to the sequencing of control effects of the two measures, the frequency recovery process is divided into two stages, i.e., the underfrequency load shedding stage without considering the effect of governor and the load recovery stage since governor is put into operation. Taking the constraint of power flow, the underfrequency load shedding and load recovery in AC and AC/DC hybrid power systems are solved by nonlinear optimization algorithm. Calculation results show that the load shedding amount by the proposed algorithm is a bit larger, however it is favorable to speed up frequency recovery; in AC/DC hybrid system the instantaneous adjusting characteristics of voltage source converter (VSC) is favorable to reduce the load shedding amount. At the second stage, the load recovery is quantified together with the governors' performance. Numerical results validate the effectiveness of the proposed algorithm.

KEY WORDS: under-frequency load shedding; governor; load recovery; optimal power flow; multi-terminal HVDC (MTDC) power transmission system

摘要: 电网有功缺额时的频率控制, 涉及快速低频减载和相对较慢的调速器动作。同时考虑两者的静态减载算法, 初期减载量较小、频率恢复时间较长。文中基于控制效果的先后顺序, 将频率调节过程分为 2 个静态阶段, 即不考虑调速器效果的低频减载阶段, 以及调速器投入及随后的负荷恢复阶

段。计及潮流约束, 采用非线性优化算法, 求解交流和交直流系统的低频减载及负荷恢复问题。计算结果表明, 文中算法减载量稍大, 有利于频率的快速恢复; 交直流混合系统中电压源变流器的瞬时调节特性, 又使减载量比纯交流系统的减载量稍低。第 2 个阶段, 结合调速器调节效果, 将该算法应用于负荷恢复量的计算。算例分析验证了所提方法的有效性。

关键词: 低频减载; 调速器; 负荷恢复; 最优潮流; 多端直流输电系统

0 引言

电力系统在遭受大扰动后会出现功率缺损和系统频率下降。为稳定系统频率和维持功率平衡, 需要采取一些措施^[1]。一种方法是低频减载(under frequency load shedding, UFLS), 另一种方法是调速控制^[2]。这 2 种方式相互配合成为频率保护的主要方法。其中低频减载的计算主要分为静态和动态方法^[3-4], 一些新的算法也使低频减载设计与优化更加合理^[5-10]。动态减载方法能够准确反映整个系统在减载过程中各种参数的变化趋势, 比较精确, 但与静态减载方法相比较复杂且计算速度慢。采用静态减载法分析扰动后的暂态过程则具有简单快速的优势。

文献[11]通过对潮流计算中的雅可比矩阵进行奇异值分解, 确定以电压稳定为目标的减载量和减载地点; 文献[12]综合考虑了 2 种调频方式, 将其表述为一个线性规划问题来确定减载量及减载地点。在原来潮流计算的基础上添加约束和修改节点方程, 使减载计算成为与频率变化量相关的等式约束, 这使减载计算更加简便快捷。但由于该方法未考虑系统中其他约束, 可能会造成优化过程中某个变量越界; 也未考虑低频减载和调速器在实际效果显现顺序上的配合过程^[13], 会造成这 2 种调频方式

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0765); 国家自然科学基金项目(50707006)。

Project Supported by Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-08-0765); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50707006).

在实际应用时的作用不能真实显现。将低频减载和调速器控制加在一个等式约束里, 必然会造成系统前期的切负荷量过小, 使原本应该快速恢复的频率变得缓慢, 低频减载的快速性得不到反映。在含有电压源换流器(voltage source converter, VSC)的多端高压直流输电系统中, VSC 既可吸收无功又可注入无功。当系统中出现扰动时, 因其控制方式是确定的, 所以控制参数为满足新的环境定会发生变化, 对上述的减载效果产生一定的影响^[14-17]。文献[15]对两端直流输电系统进行分析, 发现某端频率降低时, 另一端向该端进行快速的功率支持, 可以使扰动端的频率得到快速恢复, 但文中并未考虑多端直流输电系统为内部网络时扰动系统的影响。文献[17]分析了扰动下 VSC 的自身调节作用, 扰动后 VSC 的调节效果比低频减载要快, 使所选控制方式中固定的控制量继续保持恒定。因此使用静态方法进行的低频减载分析, VSC 可以看作是瞬时动作。

本文按调整效果显现的快慢顺序将这 2 种调节方式分阶段考虑, 即低频减载阶段的减载量计算、调速器完全投入后负荷恢复阶段的负荷恢复量计算。低频减载阶段是在计算切负荷量的过程中先不考虑调速器的效果, 这很好地解决了初始切负荷量过小的问题。系统完成切负荷后频率开始恢复, 接着调速器效果逐渐显现出来, 加快了频率的恢复速度, 对系统快速稳定是有帮助的。由于低频减载阶段已经可以抵消功率不平衡量, 调速器效果的显现会导致系统频率略高。为减少负荷的停电时间, 在调速器完全投入后, 进行负荷的快速恢复^[18-19]。要恢复减去的负荷中的一部分或者全部, 可以把恢复负荷看作减去负的负荷, 只需修改约束条件和变量数据表, 即可进行最优负荷恢复量的快速计算。含有 VSC 的多端直流输电系统中, 假设 VSC 对扰动后自身的调节过程是瞬时的, 则 VSC 对 2 个阶段的计算结果均产生影响。经分析得出当系统频率下降时, VSC 会向交流系统注入无功功率, 改变了负荷节点的功率因数, 最终导致切负荷量略小。

1 静态低频减载算法

要满足恢复频率要求的减载量, 需要找到加速功率 ΔP_{acc} 和系统频率变化量 Δf 的关系^[12,20]。当系统出现 ΔP_{acc} 不平衡量时, 综合考虑 2 种调频方式可得如下公式。

对于发电机节点

$$\begin{cases} \Delta P_i = \Delta P_{Gi} - \Delta P_{ia} = -K_{Gi} \Delta f - F_i \Delta P_{acc} \\ \Delta Q_i = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ΔP_{Gi} 为发电机有功出力增加量; ΔP_{ia} 为扰动功率分配量; K_{Gi} 为发电机频率调节效应系数; $F_i = M_i / M_T$ 为第 i 台发电机转动惯量与系统总转动惯量的比值; 定义 $\Delta f = f - f_N$; f_N 和 f 为额定频率与波动频率; $F_i \Delta P_{acc}$ 为第 i 台发电机扰动后的加速功率。

对于负荷节点, 修正方程和负荷模型为

$$\begin{cases} \Delta P_j = -\Delta(P_{Lj} - P_{slj}) + P_{slj} \\ \Delta Q_j = -\Delta(Q_{Lj} - Q_{slj}) + Q_{slj} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{Lj} = P_{Lj0} f^{\alpha_{pj}} U_j^{k_{pj}} \\ Q_{Lj} = Q_{Lj0} f^{\alpha_{qj}} U_j^{k_{qj}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{Lj} 、 Q_{Lj} 为节点 j 的有功和无功功率; P_{slj} 、 Q_{slj} 为节点 j 减载量; P_{Lj0} 、 Q_{Lj0} 为负荷节点额定运行值; α_{pj} 、 k_{pj} 、 α_{qj} 、 k_{qj} 为负荷特性参数; U_j 为负荷节点电压。

根据动态潮流分析的原理, 计算中取消平衡节点, 系统中出现的不平衡功率是系统频率变化所致, 仿照潮流计算的修正方程式, 利用常规潮流计算的雅可比矩阵可得

$$\begin{bmatrix} -F_R & H_R & N_R \\ -F_G & H_G & N_G \\ 0 & H_L & N_L \\ 0 & J_L & L_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{acc} \\ \Delta \theta_{G/L} \\ \Delta U_L / U_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_R \\ K_G \\ \partial P_L / \partial f \\ \partial Q_L / \partial f \end{bmatrix} \Delta f - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_{sl} \\ Q_{sl} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对式(4)进行前代规划和回代, 取第 1 行得到

$$\Delta P_{acc} = D \Delta f - \sum (c_{pj} P_{slj} + c_{qj} Q_{slj}) \quad (5)$$

式中: D 为系统等效阻尼系数; c_{pj} 、 c_{qj} 为规划系数。

由 $Q_{slj} = P_{slj} \tan \varphi_j$, φ_j 为负荷节点功率因数, 可化简式(5)得等式约束式(6), 再进行规划得式(7)

$$\Delta P_{acc} = D \Delta f - \sum C_j P_{slj} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \min F(P_{slj}) = \sum_{j=n+1}^m \alpha_{pj} P_{slj} \\ \Delta P_{acc} = D \Delta f - \sum C_j P_{slj} \\ 0 \leq P_{slj} \leq P_{0j} \end{cases} \quad (7)$$

简化的稳态计算频率为

$$f_{\infty} = f_N + P_{oa} / D \quad (8)$$

式中: P_{oa} 为剩余总加速功率; C_j 为规划系数; f_{∞} 为稳态计算频率。

2 按调频效果显现顺序的分步处理方案

2.1 低频减载阶段的过程分析

第 1 过程, 发生扰动初期, 发电机功角不能突

变。功率按各自的同步系数分配给发电机为

$$\Delta P_i = \frac{1}{\sum_{j \in i} \left(\frac{dp_i}{d\delta_i} \right)} \frac{dp_i}{d\delta_i} \quad (9)$$

式中： P 为有功功率； δ 为发电机功角。该阶段分配与扰动点和各电机之间的电气距离有关。其次需要说明的是不同发电机此时转速变化不同。

第2过程，0.5~2s期间，所有电机转速相等后，系统将会按照旋转机组的惯性比例大小重新分配。此时发电机出现功率缺额，发电机转子释放能量限制频率的下降速度，系统将按照平均减速度振荡衰减。当减小到某一个数值，此时为了保护系统防止频率继续下降，系统实际切负荷开始启动，经过0.3s的延时，相应部分负荷切除，系统频率开始回升。因为在第2阶段中扰动量重新分配并且此时发电机各处才同频率，所以将第1过程和第2过程负荷切除后频率开始回升段合成一个总静态切换阶段。此时调速器的调节效果仍未显现，根据上述数学方法，对于发电机节点，有功修正方程为

$$\Delta P_i = \Delta P_{Gi} - \Delta P_{ia} = -F_i \Delta P_{acc} \quad (10)$$

频率下降较大时会使得发电机无功出力下降，此处因假设发电机励磁系统足够强将该部分忽略，所以发电机节点无功平衡方程不变。负荷节点方程按式(2)修改，再直接修改式(7)可推出该过程的优化方程为

$$\begin{cases} \min F(P_{slj}) = \sum_{j=n+1}^m \alpha_{pj} P_{slj} \\ \Delta P_{acc} = D\Delta f + \sum_1^n K_{Gi} \Delta f - \sum_{n+1}^m C_j P_{slj} \\ 0 \leq P_{slj} \leq P_{0j} \end{cases} \quad (11)$$

2.2 负荷恢复阶段的过程分析

当切除部分负荷后因为频率仍在低位，原动机调速器效果将在2~3s后开始显现出来，改变原动机输出功率，此时频率将加速恢复，频率快速恢复对系统安全很有帮助。但因第一步的低频减载已经可以抵消现有的不平衡量，再加上调速器的作用，加速恢复之后，必然导致恢复频率高于额定频率。当调速器完全投入后，系统频率快速恢复到额定频率时，此刻应考虑进行负荷的恢复，并且确定最优负荷恢复量。将原动机增大功率输出的完成时刻当作一个静态点，假设此时旋转备用的投入已经使系统快速恢复到额定值频率甚至以上，现在使用减负荷以后的系统作为新系统，并且仍然使用上述数学方法，将原低频减载阶段中减去的正负荷改为减去

负的负荷，变成负荷恢复量计算。仍假设扰动量未变，对于发电机节点有功修正方程为

$$\Delta P_i = \Delta P_{Gi} - \Delta P_{ia} = -K_{Gi} \Delta f - F_i \Delta P_{acc} \quad (12)$$

负荷节点上的方程形式不变，只改变符号。求负荷恢复量最大值即求目标函数中负的负荷之和的最小值，再直接修改式(7)，得本阶段的优化形式为

$$\begin{cases} \min F(P_{slj+}) = \sum_{j=n+1}^m \alpha_{pj} P_{slj+} \\ \Delta P_{acc} = D\Delta f - \sum C_j P_{slj+} \\ P_{slj-} \leq P_{slj+} \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中加号表示所要恢复的负荷量，减号表示减载过程中减去的相应节点的负荷量加负号。

3 交直流混合系统的约束

含VSC的多端直流输电线路的等式和不等式约束将根据VSC所采用的控制方式做相应的修改。

交流侧有功平衡方程为

$$\Delta P_{si} = P_{si} - U_{si} \sum_j U_{sj} (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - \frac{\mu_i M_{DCi}}{\sqrt{2}} U_{si} U_{di} Y_i \sin(\delta_i - \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \sin \alpha_i \quad (14)$$

交流侧无功平衡方程为

$$\Delta Q_{si} = Q_{si} - U_{si} \sum_j U_{sj} (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + \frac{\mu_i M_{DCi}}{\sqrt{2}} U_{si} U_{di} Y_i \cos(\delta_i - \alpha_i) - U_{si}^2 Y_i \cos \alpha_i - Y_{ci} U_{si}^2 \quad (15)$$

直流线路侧有功平衡方程为

$$\Delta P_{ci} = U_{di} I_{di} - \frac{\mu_i M_{DCi}}{\sqrt{2}} U_{si} U_{di} Y_i \sin(\delta_i + \alpha_i) + \left(\frac{\mu_i M_{DCi}}{\sqrt{2}} \right)^2 U_{di}^2 Y_i \sin \alpha_i \quad (16)$$

直流网络内部电流平衡约束为

$$\Delta I_{di} = I_{di} - \sum_{j=1}^{n_c} g_{dij} U_{dj} \quad (17)$$

式中： μ 为直流电压利用率； δ 为基频电压与交流母线电压的移向角； M_{DC} 为调制比； U_s 为交流母线电压； U_d 为直流电压； α 为VSC等效电阻与电抗比值的反正切； I_d 为直流电流； Y 为VSC等效阻抗； g_d 为直流线路的参数。

不等式约束包括控制角极限约束、调制度极限约束、直流电压约束、直流电流约束、直流电流约束、换流器传输能力 S_d 约束、直流线路传输能力 P_d 约束。其表达式为

$$\delta_{i \min} \leq \delta_i \leq \delta_{i \max} \quad (18)$$

$$M_{DCi \min} \leq M_{DCi} \leq M_{DCi \max} \quad (19)$$

$$U_{d\min} \leq U_{di} \leq U_{d\max} \quad (20)$$

$$I_{d\min} \leq I_{di} \leq I_{d\max} \quad (21)$$

$$S_{d\min} \leq S_{di} \leq S_{d\max} \quad (22)$$

$$P_{d\min} \leq P_{di} \leq P_{d\max} \quad (23)$$

4 算例分析

选择 IEEE RTS 24 节点测试系统进行验证^[21]。添加的多端直流网络如图 1 所示。VSC1 在节点 3 上采用定直流电压(2.0 pu)、定无功功率(0.1 pu)控制；VSC2 在节点 4 上采用定有功功率(-0.45 pu)、定交流母线电压(1.0 pu)控制；VSC3 在节点 11 上采用定有功功率(-0.45 pu)、定交流母线电压(1.0 pu)控制。VSC-HVDC 系统的主电路参数 $R_1=R_2=R_3=0$ (损耗忽略)， $X_1=X_2=X_3=0.15$ pu、直流线路 $R_d=0.03$ pu，并忽略滤波器对系统影响。

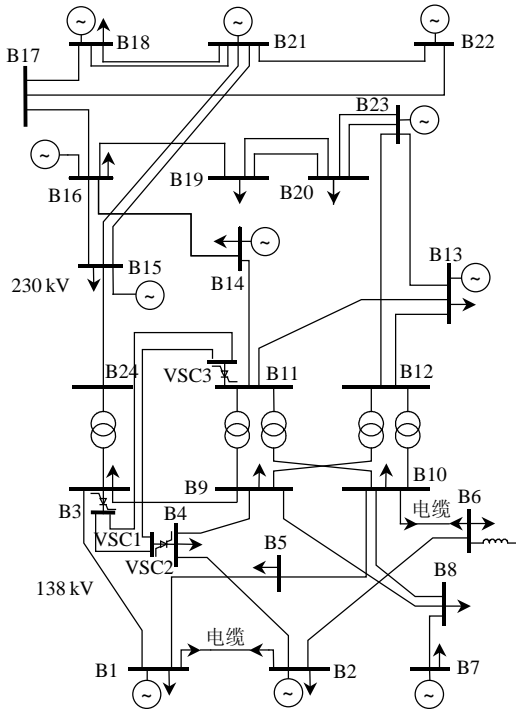


图 1 测试系统
Fig. 1 Test system

假设某时刻因节点 18 切机 80%系统中出现 $\Delta P_{acc}=316$ MW 的扰动不平衡量，先分析过程 1 的低频减载阶段，按实际响应过程分阶段分析的最优减载量与文献[12]中的计算结果如表 1 所示。稳态计算频率与额定值接近，实际低频减载计算中因未考虑调速器的影响，所以减载量比文献[12]中所测结果偏大。这保证了在初始阶段的充足减载量，为频率前期的快速恢复提供了可能。

加入多端直流网络与纯交流系统的减载结果比较，如表 2 所示。稳态计算频率与额定值接近，

表 1 交流系统低频减载结果比较
Tab. 1 Comparison of under-frequency load shedding in AC system

参数	文献[12]减负荷量/pu	分步考虑的减负荷量/pu
节点 1	1.080 0	1.080 0
节点 7	1.200 7	1.250 0
节点 15	0.000 0	0.286 2
切负荷总量	2.280 7	2.616 2

表 2 交直流系统低频减载结果对比
Tab. 2 Comparison of under-frequency load shedding in AC and hybrid system

参数	纯交流系统减负荷量/pu	AC/DC 系统减负荷量/pu
节点 1	1.080 0	1.080 0
节点 7	1.250 0	1.250 0
节点 15	0.286 2	0.149 3
切负荷总量	2.616 2	2.479 3

加入含 VSC 的直流输电系统后切负荷总量比原来减少 0.136 9 pu，其主要原因是 VSC 本身的无功调节作用。

VSC 无功补偿的效果及减负荷量略小的原因体现在表 3 中。表 3 中以注入功率为正。可以看出，扰动后除定交流母线无功功率控制的节点外均有吸收无功改为向系统注入无功，保证了扰动后电压一定程度的稳定，又因切有功负荷的同时也切除了一部分无功，系统中总的无功具有了增量，这使得等式中无功功率变化。该节点负荷的功率因数也随之发生变化，最终使得式(6)中的系数 C_j 改变，这导致所计算的最优切负荷量略小。又因控制方式的影响，所以 VSC 传输的有功功率变化不明显。

表 3 扰动前后的直流参数对比
Tab. 3 Parameter comparison of DC system before and after the disturbance

参数	额定情况下/pu			扰动之后/pu		
	VSC1	VSC2	VSC3	VSC1	VSC2	VSC3
δ	0.142 7	-0.069 7	-0.074 1	0.151 8	-0.066 3	-0.062 9
M	0.688 4	0.687 4	0.647 4	0.667 6	0.721 8	0.757 7
P_s	0.903 5	-0.450 0	-0.450 0	0.905 1	-0.450 0	-0.450 0
Q_s	0.100 0	0.225 2	0.605 2	0.100 0	-0.095 7	-0.430 7

分析过程 2，调速器响应完成后的负荷恢复阶段。负荷恢复量的结果如表 4 所示。该方法在纯交流和交直流混合测试系统中均能恢复切负荷过程中所切除的负荷，且使稳态计算频率稳定在安全区域。

表 4 负荷恢复量对比
Tab. 4 Comparison of load recovery

参数	纯交流系统恢复量/pu	加入多端直流后恢复量/pu
节点 1	-1.080 0	-1.080 0
节点 7	-1.250 0	-1.250 0
节点 15	-0.286 2	-0.149 3
恢复总量	2.616 2	2.479 3

5 结论

1) 在第1阶段的减载计算中,因不考虑调速器的响应效果,改进算法的减载量较传统算法减载量多,实际应用时有利于频率的快速恢复。

2) 在第2阶段考虑调速器的控制效果,并将第1阶段的优化减载算法应用于第2阶段,建立了负荷快速恢复的静态优化算法,负荷的快速恢复有利于减少用户停电时间。

3) 该算法应用于加入VSC的多端直流系统中,与交流系统结果相比,得出因VSC扰动后向交流系统注入无功功率,致使此时的减负荷量计算值略小。

参考文献

- [1] 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 under-frequency load shedding scheme based on load frequency characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 48-51(in Chinese).
- [2] Girgis A A, Peterson W L. Adaptive estimation of power system frequency deviation and its rate of change for calculation sudden power system overloads[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 15(2): 585-592.
- [3] Mohd Z A, Hafiz H A, Wong W K. Static and dynamic under-frequency load shedding a comparison[C]/International Conference on Power System Technology Powercon. Singapore: IEEE, 2004: 941-945.
- [4] Delfino B, Massucco S, Morini A, et al. Implementation and comparison of different under frequency load-shedding schemes[C]/IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Geneva, Italy: IEEE, 2001: 307-312.
- [5] Mitchell M A, Pecas L J, Fidalgo J N, et al. Using a neural network to predict the dynamic frequency response of a power system to an under-frequency load shedding scenario[C]/Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle, WA: Power Engineering Society and Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000: 346-351.
- [6] Pecas J A, Wa W C, Proenca L M. Genetic algorithms in the definition of optimal load shedding strategies[C]/International Conference on Electric Power Engineering. Budapest: IEEE, 1999: 154.
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 林湘宁,李正天,薄志谦,等. 适用于微网孤岛运行的低频减载方法[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 16-20.
Lin Xiangning, Li Zhengtian, Bo Zhiqian, et al. An under-frequency load shedding method adaptive to the islanding operation of micro-grids[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 16-20(in Chinese).
- [10] 解大,何恒靖,常喜强,等. 计及同调分区和全局优化的电力系统低频减载方案[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 106-112.
Xie Da, He Hengjing, Chang Xiqiang, et al. An approach to design power system underfrequency load shedding scheme taking coherent area and global optimization into account[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 106-112(in Chinese).
- [11] Xu J, Qi W, Wang L, et al. Study of load shedding procedure for power system voltage stability[C]/Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Cheng Du, China: IEEE Power & Energy Society(PES), 2010: 1-4.
- [12] 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 low frequency load shedding in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(10): 23-25(in Chinese).
- [13] 赵强,王丽敏,刘肇旭,等. 全国电网互联系统频率特性及低频减载方案[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 35-40.
Zhao Qiang, Wang Limin, Liu Zhaoxu, et al. Study on dynamics frequency characteristics and coordinative under-frequency load shedding scheme for nationwide interconnected power grid of China[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 35-40(in Chinese).
- [14] 江全元,耿光超. 含高压直流输电系统的内点最优潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 43-44.
Jiang Quanyuan, Geng Guangchao. Interior-point optimal power flow with the high voltage direct current transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 43-44(in Chinese).
- [15] Zhao C, Li L, Li G, et al. A novel coordinated control strategy for improving the stability of frequency and voltage based on VSC-HVDC[C]/International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing, China: Southeast University, 2008: 2202-2206.
- [16] 郑超,盛灿辉. 含VSC-HVDC的交直流混合系统潮流统一迭代求解算法[J]. 中国电力, 2007, 40(7): 65-69.
Zheng Chao, Sheng Canhui. Uniform iterative power flow algorithm for systems equipped with VSC-HVDCs[J]. Electric Power, 2007, 40(7): 65-69(in Chinese).
- [17] Du C, Ambra S, Math H J. Analysis of response of VSC-based HVDC to unbalanced faults with different control systems[C]/IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific. Dalian, China: IEEE, 2005: 1-6.
- [18] 赵晋泉,王毅. 一种模拟负荷动态恢复特性的连续潮流模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 59-63.
Zhao Jinquan, Wang Yi. A novel continuation power flow model for simulation time-domain dynamic load restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 59-63(in Chinese).
- [19] 周云海,闵勇. 负荷快速恢复算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 74-79.
Zhou Yunhai, Min Yong. Optimal algorithm for fast load recovery[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 74-79(in Chinese).
- [20] 蔡泽祥,刘昕. 一种分析频率稳定性的快速算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1996, 8(4): 23-29.
Cai Zexiang, Liu Xin. An fast algorithms for analysis of frequency stability[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1996, 8(4): 23-29(in Chinese).
- [21] Reliability Test System Task Force. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.



李生虎

收稿日期: 2011-02-24.

作者简介:

李生虎(1974),男,博士,研究员,从事电力系统分析与控制的研究和教学工作, E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn;

贾树森(1986),男,硕士研究生,研究方向为交直流系统优化运行和控制, E-mail: jiasen105@163.com;

孙莎莎(1988),女,硕士研究生,研究方向为风电系统分析计算。

(责任编辑 王晔)