

恢复潮流可行解的优化控制策略

郭 力, 张 尧, 胡金磊, 李 聪

(华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640)

摘要: 针对一系列预想故障, 提出了一种恢复潮流可行解的优化控制策略。该策略采用恢复潮流解和恢复可行解的两步法, 以最小控制代价为目标, 把恢复系统可行解的控制问题转化为一类非线性规划问题求解。针对无潮流解的故障, 利用最优切负荷算法恢复潮流解, 同时利用模式分析法研究了节点注入无功功率对应关键电压失稳模式的参与因子, 这些参与因子决定了在随后恢复可行解的过程中负荷切除和发电机出力调整的优先权。采用考虑离散变量的原-对偶内点法求解上述非线性优化问题。算例仿真表明, 通过模式分析选择优化变量减小了优化问题的规模, 提高了优化计算的收敛速度。

关键词: 电压稳定; 优化控制; 可行域; 参与因子; 原-对偶内点法

中图分类号: TM732; TM714.2

0 引言

电力系统静态电压问题可以认为是由系统无功不足引起的, 而导致无功不足的原因主要是发电机出力限制或传输线路的传输能力限制。文献[1]通过静态分岔处的灵敏度分析得出潮流方程的分岔与静态电压崩溃相关。当由于系统参数变化使得潮流方程无解时, 系统发生了简单转折分岔 (Fold 分岔)。因此, 潮流方程的有解性是电力系统稳定的一个必要条件。

文献[2]最早提出了注入参数空间“静态安全域”的概念, 文献[3]在此基础上提出了多维参数空间中可行域的概念, 系统参数可以是发电机注入功率、负荷有功和无功等。可行域是可解域中所有约束条件都满足的点, 其中可解域是指参数空间中存在潮流解的点, 其边界通常由 Fold 点组成。不可行域是指潮流有解、但系统的发电机无功出力约束限制或者电压限制等约束条件并不满足的点。为保证系统安全运行, 通常要求系统能够承受一定的故障 (如 $N-1$ 准则); 实际运行中, 当出现无解或某些约束条件越限的情况时, 需要采用各种控制手段恢复系统的可行解, 且尽量满足控制措施的经济性指标。主要的控制手段有发电机出力调整、负荷切除、电容器组的投切、有载调压变压器抽头的选择等。

针对潮流无解的故障, 文献[3]把参数空间中无解的点与最临近可解域边界上点的距离的计算转化

为一类非线性优化问题, 从而确定了恢复潮流解的最小负荷切除量。文献[4]在此基础上提出了一种求解潮流可解域、可行域边界的混合算法。文献[5]利用混合法对发电机注入子空间中可行域边界的拓扑结构进行了讨论。为了提高计算电压稳定临界点的速度和效率, 文献[6-7]分别引入内点法和最优乘子潮流求解上述优化问题。文献[8]认为潮流无解是由于少数薄弱通道超过输送功率极限引起, 并结合灵敏度方法采用调整发电机出力和切除负荷的措施得到收敛的潮流解。为了将系统恢复到可行状态, 消除系统越限, 文献[9]提出了预防、校正两步法的控制手段, 在满足预定电压稳定运行约束下最小化控制代价。文献[10]进一步提出了提高静态安全的联动切负荷算法。

本文根据潮流可行域的特点, 在两步法的基础上针对预想事故集合提出了一种优化控制策略, 使系统在 $N-1$ 情况下具有可行的运行状态。针对系统无潮流解的情况, 采取比较有效的负荷切除算法使系统快速恢复潮流解。如果系统各个约束此时超出限制条件, 通过再分配发电机有功和无功出力、切除负荷、调整离散设备变量, 恢复系统至可行域范围内, 消除系统的约束限制。采用了能够有效计及离散变量特性的扩展原-对偶内点法进行优化计算^[11]。IEEE 39 节点算例系统表明了该方法的简单、快速和有效性。

1 优化控制模型

1.1 恢复潮流解的最优切负荷

通常潮流方程可以分解为如下形式^[4]:

$$\begin{cases} \mathbf{F}_1(\mathbf{x}) - \mathbf{S}_D = \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_2(\mathbf{x}) - \mathbf{G}(\mathbf{S}_D) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{S}_D$ 为系统中可以独立变化的注入量, 代表负荷注入空间的负荷注入量; $\mathbf{G}(\mathbf{S}_D)$ 为随 $\mathbf{S}_D$ 变化的注入量, 代表发电机注入空间的有功注入。

不同调度方式下发电机有功出力的组合不同, 机组的有功出力调整一般有 2 种方式, 一种是有功负荷及其网损的增量由平衡机承担, 另一种是有功增量由除平衡节点之外的若干台发电机按照预定比例分摊, 而网损则由平衡机来承担。恢复潮流解的最优切负荷数学模型为:

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2}(\mathbf{S}_D - \mathbf{S}^*)^T(\mathbf{S}_D - \mathbf{S}^*) \\ \text{s. t.} \quad \text{式(1)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{S}^*$ 为优化后的负荷量。

定理 1 如果注入点 $\mathbf{S}_D$ 位于潮流可解域之外, 式(2)确定的优化问题的解 $\mathbf{S}^*$ 将位于潮流可行域的边界面上, 由解得到的优化乘子即为潮流雅可比矩阵在这一点零特征根对应的左特征向量, 且在最优解处为边界的法向量, 证明见文献[3]。

在恢复潮流解的控制中, 由于系统的故障使得系统潮流可解域大大收缩, 从而导致潮流无解。如果发生潮流无解, 当前控制的主要措施是尽快恢复系统的潮流解, 因此不考虑变压器抽头以及电容器投切等慢动态元件对恢复潮流解的作用。恢复后的潮流解所对应的雅可比矩阵具有唯一零特征根。

1.2 恢复可行解的最优控制措施

如果系统在恢复潮流解之后存在越限情况, 则需要采取有效措施将系统的平衡点调整到可行域之内, 本文采取的控制措施包括负荷切除、发电机有功出力调整、补偿电容器、调节有载调压变压器抽头等。

电压稳定问题通常是局部问题, 因此首先采用模式分析方法^[12], 挑选出与电压失稳模式相关的关键负荷节点, 然后重新优化发电机的出力, 并同时切除部分负荷。系统各节点对电压稳定的影响可以通过雅可比矩阵的关键特征根及其对应的左右特征向量进行分析。线性化后的潮流方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{PQ} & \mathbf{J}_{PV} \\ \mathbf{J}_{QV} & \mathbf{J}_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\Delta \mathbf{P}$, $\Delta \mathbf{Q}$ 分别为节点注入有功、无功功率的变化量; $\Delta \mathbf{V}$, $\Delta \boldsymbol{\theta}$ 分别为节点电压幅值、相角的变化量。

电压水平通常与系统中的无功功率平衡有关。为简化计算, 假定注入的有功功率恒定, 可得降阶后的雅可比矩阵:

$$\Delta \mathbf{Q} = (\mathbf{J}_{QV} - \mathbf{J}_{QV} \mathbf{J}_{PV}^{-1} \mathbf{J}_{PV}) \Delta \mathbf{V} = \mathbf{J}_s \Delta \mathbf{V} \quad (4)$$

计算 $\mathbf{J}_s^{-1}$ 中关键特征根 i 及其对应的左右特征向量 $\mathbf{w}_i$, $\mathbf{u}_i$, 得到节点 k 对关键模式 i 的参与因子 P_{ki} :

$$P_{ki} = \mathbf{u}_{ki} \mathbf{w}_{ki} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{u}_{ki}$ 为 $\mathbf{u}_i$ 的第 k 个元素; $\mathbf{w}_{ki}$ 为 $\mathbf{w}_i$ 第 k 个元素; P_{ki} 反映了母线电压的变化对无功需求的影响。

求解最小控制代价的问题通常是一类非线性混合整数规划问题, 其数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min f = & \sum_{i \in S_G} \omega_{pi} (a_i + b_i (P_{Gi} - P_{Gi}^0) + \\ & c_i (P_{Gi} - P_{Gi}^0)^2) + \sum_{i \in S_B} \omega_{ci} (B_i - B_i^0) + \\ & \sum_{i \in S_T} \omega_{ti} (T_i - T_i^0) + \sum_{i \in S_L} \omega_{li} (P_{Li} - P_{Li}^0) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: P_{Gi} 为发电机有功出力; a_i , b_i , c_i 为发电机二次成本函数的系数, 切负荷采用线性控制成本函数; S_G 为参与优化计算的所有发电机节点集合; S_L 为参与优化计算的所有负荷节点集合; P_{Li} 为对应的负荷有功, 在切除有功负荷的同时按照原功率因数切除相当的无功负荷; B_i , T_i 为离散控制变量, 分别代表无功补偿设备电纳和有载调压设备的分接头; S_B , S_T 分别为 B_i , T_i 构成的相应集合; ω_{pi} , ω_{li} , ω_{ci} , ω_{ti} 是目标函数中分别对应各自控制量的权系数。

通常情况下, 负荷切除成本高于其他控制手段, 有载调压变压器及并联补偿设备的调节成本次之, 发电机出力调整成本相对较小, 所以 ω_{li} 应高于 ω_{pi} 。 ω_{pi} 与 ω_{li} 的值由模式分析中参与因子的倒数决定, 参与因子大的发电机, 其权系数相对较小。由于发电机权系数相对较小, 其倒数较大, 因此首先乘以一个系数使其倒数保持在 0~2 之间。如果负荷权系数的最小值 $\omega_{l, \min}$ 与发电机权系数的最大值 $\omega_{p, \max}$ 不满足 $\omega_{l, \min} \geq \omega_{p, \max}$, 则用上述 2 个极值的比例 $\omega_{p, \max} / \omega_{l, \min}$ 乘以负荷权系数, 调整负荷权系数的值大于发电机最大权系数。离散变量的权系数 ω_c 与 ω_t 取发电机平均权系数与负荷平均权系数的均值。

电力系统的安全运行必须在一定的变量约束范围内才得以保证, 等式约束条件为:

$$\begin{cases} P_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij}(\mathbf{B}, \mathbf{T}) \cos \theta_{ij} + \\ \quad B_{ij}(\mathbf{B}, \mathbf{T}) \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij}(\mathbf{B}, \mathbf{T}) \sin \theta_{ij} - \\ \quad B_{ij}(\mathbf{B}, \mathbf{T}) \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

不等式约束条件包括所有节点的电压限制、发电机节点有功、无功出力限制、支路传输的有功功率限制、可调变压器分接头和无功补偿设备电纳限制:

$P_{Li,min} \leq P_{Li} \leq P_{Li,max}$ $P_{Gi,min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,max}$ $Q_{Gi,min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,max}$ $S_{i,min} \leq S_i \leq S_{i,max}$ $B_{i,min} \leq B_i \leq B_{i,max}$ $T_{i,min} \leq T_i \leq T_{i,max}$ $U_{i,min} \leq U_i \leq U_{i,max}$

$i \in S_L$ $i \in S_G$ $i \in S_G$ $i \in S_f$ $i \in S_B$ $i \in S_T$ $i \in S_N$

(8)

上述问题简化表达如下：

$\min f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3)$ $\text{s. t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3) = \mathbf{0}$ $S_{\min} \leq \mathbf{S}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3) \leq S_{\max}$ $\mathbf{x}_{1,min} \leq \mathbf{x}_1 \leq \mathbf{x}_{1,max}$ $\mathbf{x}_{2,min} \leq \mathbf{x}_2 \leq \mathbf{x}_{2,max}$ $\mathbf{x}_{3,min} \leq \mathbf{x}_3 \leq \mathbf{x}_{3,max}$

(9)

式中： $\mathbf{x}_1=[\mathbf{B}, \mathbf{T}]$ ，为离散控制变量； $\mathbf{x}_2=[\mathbf{P}_G, \mathbf{Q}_G, \mathbf{P}_L]$ ，为连续控制变量； $\mathbf{x}_3=[\mathbf{U}, \boldsymbol{\theta}]$ ，为状态变量； $\mathbf{g}$ 为潮流方程； $\mathbf{S}$ 为不等式约束，即支路传输有功功率限制。

1.1 节和 1.2 节把电压稳定的优化控制转化为一类典型的非线性规划问题求解。1.2 节中通常包含有可投切电容器、有载调压变等离散变量，以及发电机有功出力、负荷等连续变量。鉴于传统内点法在求解电力系统非线性规划问题中的优越性，采用文献[11]提出的考虑离散变量的扩展原-对偶内点法进行优化计算，通过引入正曲率二次罚函数将离散变量 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{T}$ 直接嵌入到非线性原对偶内点法中形成扩展拉格朗日函数计算。正曲率二次罚函数的形式为：

$\frac{1}{2} \sum_{j=1}^q v_j (x_{1j} - x_{1jb})^2$

(10)

式中： $\mathbf{x}_1, \mathbf{v} \in \mathbf{R}^q$ ； v_j 为离散变量 x_{1j} 的罚因子； x_{1jb} 为 x_{1j} 的邻域中心。

2 计算流程

计算流程步骤如下：

- 1)根据当前负荷水平由潮流计算得到系统的故障集合。
- 2)从故障集合中随机选择一个故障，若系统无解，转步骤 3 恢复潮流解；若存在潮流解，则判断是否存在越限，若存在越限转步骤 4 恢复可行解，若无越限发生则进行下一个故障计算。
- 3)计算最小切负荷量。
- 4)计算最优控制措施。
- 5)如果对于所有故障，系统电压都能够运行在安全稳定的水平上，则停止计算。

3 算例分析

采用 IEEE 39 节点系统^[13]验证算法的有效性。原始算例系统网架结构紧密，并满足 N-1 准则。为了获得故障情况下潮流无解的负荷模式，首先提高全网的负荷水平，所有节点的有功、无功负荷按照其基负荷同比例增长，负荷的增长量由除平衡节点外的发电机承担，调整后的有功、无功负荷参数如表 1 所示。

表 1 调整后的有功、无功负荷

Table 1 Active and reactive power load

节点号	有功/MW	无功/Mvar	节点号	有功/MW	无功/Mvar
3	387	3	21	339	142
4	565	208	23	313	107
7	299	107	24	374	-112
8	587	199	25	289	61
12	74	761	26	204	25
15	385	184	27	346	93
16	395	39	28	271	36
18	223	42	29	349	33
20	745	113			

该算例中有 12 台可调变压器，电压幅值、变压器变比调节上下限均为 0.94~1.06，电容器补偿根据实际电容器的安装位置和补偿容量而定，本算例中在节点 10,11,12,13 安装可调电容器进行无功补偿，电容器分 4 组，每组容量为 8 Mvar。

在当前负荷水平以及发电机出力分配下，系统对多个线路的故障均出现无潮流解和电压过低的现象。由故障引发的电压越限大多集中在负荷节点上，以线路 2-3,14-15 断线（分别记为故障 1,2）为例，按照第 2 节步骤求解最优负荷切除控制，获得系统潮流解。表 2 给出了电压越限的情况。设发电机无功限制为 0.4~0.8，线路 2-3 断线时，32 与 35 号发电机无功越限，14-15 断线时，32 号发电机无功越限。

表 2 电压越限

Table 2 Bus voltage beyond limit

故障	电压越限点	越限电压	故障	电压越限点	越限电压
1	4	0.890	2	4	0.919
	7	0.896		8	0.916
	8	0.897		10	0.915
	11	0.889		11	0.905
	12	0.682		12	0.693
	13	0.885		13	0.900
	14	0.896		14	0.908

利用模式分析找出与当前关键电压失稳模式相关的节点，选择较少的发电机和负荷进行优化计算。

当前潮流解附近利用模式分析得到的各节点针对关键电压失稳模式的参与因子由图 1 所示。

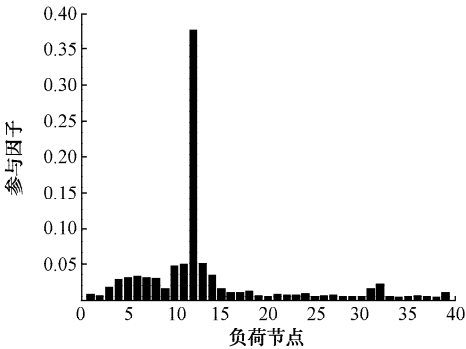


图 1 各节点参与因子
Fig. 1 Bus participation factors

选择发电机 31,32,35,36,39 进行出力调整,选择负荷节点 3,4,7,8,12 和线路 6-31,11-12,12-13,10-32 的可调变压器参与优化计算。由于算例中发电机的参与因子相对负荷节点较小,首先对所有的发电机节点的参与因子乘以 20,其权值 w_{pi} 为新参与因子的倒数;负荷节点的权值 w_{li} 在取自倒数的同时乘以一定的比例,使其值远高于 w_{pi} ; w_{ci} 与 w_{ti} 取为 15。相对选取所有的发电机、负荷节点的注入功率和可调变压器作为控制变量,优化速度得到了提高。以本算例系统为例,优化速度提高了 2.7 s。

单个负荷节点的最大负荷切除量根据实际情况进行设定,本算例中设定每个负荷节点的最大切除负荷不超过该负荷的 40%。

故障 1 发生后电压的最大值和最小值分别为 1.049,0.682,故障 2 发生后电压最大值和最小值分别为 1.048,0.693。优化调整后,2 种故障后电压都恢复到 0.94~1.06 范围内。

表 3、表 4 分别为采用原-对偶内点法得到的最优发电机有功、无功出力;表 5 为 2 次优化计算中各节点负荷切除量及总切除负荷占系统全负荷的百分比。

表 3 故障后优化前后的发电机有功出力
Table 3 Active power generation before and after optimization under contingency

母线	发电机有功出力/MW			母线	发电机有功出力/MW		
	优化前	优化后			优化前	优化后	
		故障 1	故障 2			故障 1	故障 2
30	299.10	299.10	299.10	35	777.60	731.02	780.91
31	572.90	629.96	632.61	36	669.90	691.43	700.00
32	777.60	426.84	416.65	37	646.00	646.00	646.00
33	756.10	756.10	756.10	38	993.00	993.00	993.00
34	607.70	607.70	607.70	39	1 196.30	1 114.25	1 321.75

为进一步校验该方法的有效性,针对其他导致

无解或者解越限的分析结果表明,优化后的发电机出力能够使系统在多种故障下具有可行解,此处不再赘述。

表 4 故障后优化前后的发电机无功出力
Table 4 Reactive power generation before and after optimization under contingency

母线	发电机无功出力/Mvar			
	故障 1		故障 2	
	优化前	优化后	优化前	优化后
30	112.97	-183.51	261.48	179.19
31	565.26	421.69	506.33	435.24
32	753.77	400.00	699.63	400.00
33	283.98	203.57	193.99	201.08
34	260.29	202.30	218.49	201.20
35	428.86	306.14	326.88	314.91
36	235.35	123.08	177.35	126.41
37	95.84	222.91	92.90	9.29
38	191.46	161.82	131.16	112.48
39	268.84	160.01	245.99	57.67

表 5 负荷切除量
Table 5 Load shedding and its capacity

故障	切负荷点	切除有功/MW	切除无功/Mvar	切负荷量占总负荷的比例/(%)
1	4	222.56	81.90	7.7
	7	117.71	42.27	
	8	53.16	17.99	
	12	28.17	278.29	
2	4	100.01	81.90	5.7
	7	29.36	10.54	
	12	28.17	278.29	

4 结语

本文提出了一种预想故障下恢复潮流可行解的快速、有效的优化控制策略。对于没有潮流解的故障,采用最优切负荷方法,恢复系统潮流解,利用模式分析找出与当前关键电压失稳模式相关的节点,缩小了优化问题的规模,提高了优化速度。将该方法应用于电压稳定的优化控制研究中,通过重新分配发电机出力和切除适当的负荷,以最小的代价保证系统对于多个预想故障都具有足够的安全稳定裕度。

南方电网公司李鹏博士对本文工作提供了研究资料,在此表示诚挚的感谢。

参考文献

[1] KWANTY H G, PASRIJA A K. Static bifurcations in electric power networks: loss of steady-state stability and voltage stability. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1986, 33(10): 981-991.

- [2] BANAKAR M H, GALIANA F D, JARJIS J. Security region in power networks// Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems; Vol 3, Apr 27-29, 1981, Chicago, IL, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1981, 750-754.
- [3] OVERBYE T J. A power flow measurement for unsolvable cases. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1359-1365.
- [4] 余贻鑫, 李鹏. 基于混合法的潮流可行域边界计算. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 18-24.
- YU Yixin, LI Peng. Computing the boundary of the power flow feasible region based on the hybrid method. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13): 18-24.
- [5] 余贻鑫, 李鹏, 孙强, 等. 电力系统潮流可行域边界拓扑性质及边界算法. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 6-11.
- YU Yixin, LI Peng, SUN Qiang, et al. Study on topological properties of boundary of power flow feasibility region and algorithm for boundary computation. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 6-11.
- [6] 胡泽春, 王锡凡. 基于最优乘子潮流确定静态电压稳定临界点. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 6-11.
- HU Zechun, WANG Xifan. Determination of static voltage collapse point based on load flow method with optimal multiplier. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 6-11.
- [7] PARKER C J, MORRISON I F. Application of an optimization method for determining the reactive margin from voltage collapse in reactive power planning. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1473-1481.
- [8] 李敏, 陈金富, 陈海焱, 等. 一类潮流计算无解的实用性调整研究. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 11-15.
- LI Min, CHEN Jinfu, CHEN Haiyan, et al. Load flow regulation for unsolvable cases in a power system. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 11-15.
- [9] FENG Z H, AJJARAPU V. A comprehensive approach for preventive and corrective control to mitigate voltage collapse. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 791-797.
- [10] 傅旭, 王锡凡. 静态电压稳定联动切负荷算法. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 82-86.
- FU Xu, WANG Xifan. New approach to load-shedding in static state security analysis of power systems. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 82-86.
- [11] 程莹, 刘明波. 求解离散无功优化的非线性原-对偶内点算法. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 23-27.
- CHENG Ying, LIU Mingbo. Nonlinear primal-dual interior point algorithm for discrete reactive power optimization. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9): 23-27.
- [12] DE OLIVEIRA C C, FALCAO D M, TARANTO G N, et al. Voltage stability assessment by fast time domain simulation and interior-point optimal power flow// Proceedings of IEEE PES Power Systems Conference and Exposition; Vol 3, Oct 10-13, 2004, New York, NY, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 1272-1276.
- [13] 李鹏. 从平衡点到振荡: 基于域、分岔及阻尼理论的电力系统稳定分析[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- LI Peng. From equilibrium to oscillation: power system stability analysis based on region theory, bifurcation and damping theory[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.

郭力(1981—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电压稳定与优化控制. E-mail: guolidir@sohu.com

张尧(1948—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制等。

胡金磊(1981—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制。

An Optimal Control Strategy for Recovering Feasible Solution of the Power Flow

GUO Li, ZHANG Yao, HU Jinlei, LI Cong

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: An optimal control strategy for recovering the feasible solution of the power flow under specified contingencies is proposed. This algorithm aims to minimize the control cost while recovering the feasibility of the power flow. The recovering process is transformed into a nonlinear programming problem which is solved in two steps, restoring solvability and restoring feasibility. The optimal load shedding method is used to regain power flow solutions under specified contingencies, while a modal analysis is made to determine the participation factors of each bus related to the key instability mode. These participation factors are used to determine a priority list for the optimal power flow tool to minimize the load shedding and re-dispatch of the active/reactive power generation. The primal-dual interior-point algorithm is applied to solving the integrated mixed-integer and nonlinear problem. The simulation results show that the modal analysis has reduced the dimensions of the problem and improved the converging speed, which is important for on-line real-time control.

This work is supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 50337010).

Key words: voltage stability; optimal control; feasible region; participation factor; primal-dual interior-point algorithm