

含暂态能量裕度约束最优潮流问题的线性规划解法

付钢, 刘明波

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 提出了计及暂态稳定约束最优潮流问题的线性规划模型。利用暂态能量裕度的解析灵敏度分析方法表达暂态稳定裕度增量与控制变量增量之间的线性关系, 以此显式描述暂态稳定性约束, 并加入到常规线性化最优潮流的不等式约束中。并采用单纯形法求解。对 WSCC 3机 9节点系统的优化计算结果表明, 该模型能较好地保证系统的暂态稳定性, 有效地解决系统运行的经济性和安全性的结合问题。

关键词: 最优潮流; 主导不稳定平衡点; 暂态稳定; 灵敏度分析; 线性规划

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)10-0012-05

0 引言

自从 20 世纪 60 年代法国的 Capentier 提出最初的最优潮流模型以来, 广大学者对最优潮流问题进行了大量的研究。然而, 由于传统的最优潮流没有考虑暂态稳定约束, 在其得出的最优运行方式下系统可能会遇到暂态稳定性问题。特别是在电力市场化运营机制下, 为了追求最大经济效益, 电力系统常常在接近于稳定极限的运行方式下工作, 稳定事故极易发生, 如何把系统的安全性和经济性融为一体, 就显得更为重要。因此, 近年来关于包含暂态稳定约束的最优潮流 (Stability constrained optimal power flow, SCOPF) 的研究引起了各国学者广泛的兴趣。

迄今为止, 对于包含暂稳约束的最优潮流, 已提出了两种求解方法, 都基于暂态稳定分析的时域仿真法: 在传统的最优潮流中直接加入暂稳约束条件, 将微分方程差分化, 然后采用与一般的最优潮流问题相同的算法来求解^[1,2]; 基于 Euclidean 空间变换, 把一个含有大量约束的 SCOPF 优化问题转换为与一般的最优潮流相同规模的优化问题^[3,4]。第 1 种方法由于暂态稳定分析需要离散化研究的时间段, 离散步长大小的变化使计及暂态稳定约束的最优潮流问题又包括维数不确定的微分方程及不等式约束, 且变量数大大增加, 导致求解规模巨大; 第 2 种方法中虽然降低了优化问题的规模, 但其海森矩阵的计算量非常大。

本文采用电力系统暂态稳定的能量函数分析中

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50277013)

的主导不稳定平衡点法 (Controlling unstable equilibrium point, CUEP), 借助于暂态能量裕度灵敏度分析的解析方法, 将暂态能量裕度约束直接加入最优潮流模型中, 建立起计及暂态稳定约束的最优潮流线性规划模型, 取得了较好的结果。

1 暂态稳定约束

1.1 发电机模型及故障轨线计算

发电机采用暂态电抗 X_d 和暂态电势 E 恒定的经典模型, 负荷采用恒阻抗模型, 则在 COI (Center of inertia) 坐标下发电机转子运动方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i \\ \dot{\omega}_i = -\frac{N}{M_i} \left[P_i - P_{ei}(t) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}(t) \right] \end{cases} \quad (1)$$

其中: S_g 为发电机集合的下标集; δ_i 和 ω_i 分别为在 t 时刻发电机转角和角速度偏差; N 为发电机额定转速; M_i 为发电机惯性时间常数;

$$M_T = \sum_{i=1}^{ng} M_i$$

$$P_{ei}(t) = \sum_{j=1}^{ng} (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2)$$

式中: ng 为系统中发电机数目; $C_{ij} = E_i E_j B_{ij}$, $D_{ij} = E_i E_j G_{ij}$, E_i 为第 i 台发电机的电势; $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ 为收缩到发电机内电势节点的简化网络导纳矩阵元素; $P_i = P_{Mi} - E_i^2 G_{ii}$, P_{Mi} 为原动机机械输出功率;

$$P_{COI}(t) = \sum_{i=1}^{ng} P_i - \sum_{i=1}^{ng} P_{ei}(t)$$

由于从故障发生 ($t=0$) 到故障切除时 ($t=t_1$) 的故障轨线是平滑的, 可围绕事故前稳定平衡点的状态量, 用有限的 Taylor 级数项展开, 确定各时刻的

状态。由于故障过程中的网络结构只是一种形态,奇次导数项都为 0。

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\delta}^{(0)} &= \dot{\delta} \\ \dot{\delta}^{(2)} &= \frac{1}{M_i} [P_i - \sum_{j=1}^{ng} (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij})] - \\ &\quad \frac{2}{M_T} \sum_{t=1}^{ng-1} \sum_{j=t+1}^{ng} D_{ij} \cos \delta_{ij} \\ \dot{\delta}^{(4)} &= \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^{ng} [D_{ij}^{(2)} \sin \delta_{ij} - C_{ij}^{(2)} \cos \delta_{ij}] - \\ &\quad \frac{2}{M_T} \sum_{t=1}^{ng-1} \sum_{j=t+1}^{ng} D_{ij}^{(2)} \sin \delta_{ij} \\ &\quad \dots \end{aligned} \right. \quad (3)$$

本文采用了六阶 Taylor 级数展开来计算故障轨线,以 0.01 s 的步长前进,计算公式如式(4);在相同精度下其计算速度与 Runge-Kutta 法相比提高了一个数量级。

$$\left\{ \begin{aligned} \delta &= \delta^{(0)} + \frac{1}{2} \dot{\delta}^{(2)} t^2 + \frac{1}{24} \dot{\delta}^{(4)} t^4 + \frac{1}{720} \dot{\delta}^{(6)} t^6 \\ \dot{\delta} &= \dot{\delta}^{(2)} t + \frac{1}{6} \dot{\delta}^{(4)} t^3 + \frac{1}{120} \dot{\delta}^{(6)} t^5 \end{aligned} \right. \quad (4)$$

1.2 主导不稳定平衡点法及其灵敏度分析

CUEP 法主要有如下两种:MOD 法(故障模式法)和 BCU 法^[5,6](基于稳定域边界的主导不稳定平衡点法)。

其中 BCU 法建立在被研究的原始系统稳定域边界与其收缩系统(梯度动态系统)稳定域边界的关系的基础上,而基于灵敏度的 BCU 法^[7,8]的显著特征是针对任何新的情况(相对于基本情况)不依赖于主导不稳定平衡点不变的假设,也正是因为此点,无法用解析法求出暂态稳定裕度的灵敏度。

MOD 法则是根据一定的物理判据来选定最终的故障模式来求解 CUEP 点,是一种启发式方法。基于 MOD 法进行稳定裕度的灵敏度计算时必须假定 CUEP 点不变(CUEP 点落在同一流形内),只要系统的变化不影响 MOD 时,计算是有效的^[9,10]。在最优潮流计算中,每一步迭代造成系统状态的变化都比较小,不会影响到 MOD,这一点在计算中可以看到,初始状态和最终优化状态的 CUEP 点差别很小;文献[9]提到由于方法本身的限制,该方法在某种故障下将无法收敛 CUEP 点,而且结果一般都偏于保守;但在能工作的情况下,有比较好的结果。因此,在计算 CUEP 点时采用了 MOD 法,其步骤如下:

1) 选择候选故障模式。确定临界机组群,形成不同的候选模式。

2) 构成角点,并对其进行惯性中心校正。

3) 估计 CUEP 点的初值。沿事故后的 SEP (Stable equilibrium point) 点与校正后的角点间的直线上寻找位能最大值点,此点必落在势能界面上,作为计算 CUEP 点的初值。

4) 故障模式试验。选择故障后网络的能量吸收能力最小者作为选定模式。

5) 根据选定的模式,求解 CUEP 点。

CUEP 点求出后,就可以用下式来计算暂态能量裕度:

$$T = -\frac{1}{2} M_{eq} \frac{c^2}{eq} - \sum_{i=1}^{ng} P_i^{PF} (\delta_i^u - \delta_i^{cl}) - \sum_{i=1}^{ng-1} \sum_{j=i+1}^{ng} [C_{ij}^{PF} (\cos \delta_{ij}^u - \cos \delta_{ij}^{cl}) - D_{ij}^{PF} (\sin \delta_{ij}^u - \sin \delta_{ij}^{cl})] \quad (5)$$

式中:下标 eq 表示临界机组群和其它机组群的等值参数;上标 u 和 cl 分别表示主导不稳定平衡点、故障切除时的参数;上标 PF 表示事故后网络。 $\delta_{ij} = \frac{\delta_i^u + \delta_j^u - \delta_i^{cl} - \delta_j^{cl}}{\delta_{ij}^u - \delta_{ij}^{cl}}$,其它与前相同。

要将稳定约束加入最优潮流中,必须求取稳定裕度对控制变量的偏导数,即灵敏度。由式(5)得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial} &= -M_{eq} \frac{c^1}{eq} \frac{\partial}{\partial} - \sum_{i=1}^{ng} [P_i^{PF} (\frac{\partial \delta_i^u}{\partial} - \frac{\partial \delta_i^{cl}}{\partial}) + \\ &\quad (\delta_i^u - \delta_i^{cl}) (\frac{\partial P_{Mi}}{\partial} - 2E_i G_{ii}^{PF} \frac{\partial E_i}{\partial})] - \\ &\quad \sum_{i=1}^{ng-1} \sum_{j=i+1}^{ng} [(\cos \delta_{ij}^u - \cos \delta_{ij}^{cl}) \frac{\partial C_{ij}^{PF}}{\partial} - \\ &\quad \delta_{ij} (\sin \delta_{ij}^u - \sin \delta_{ij}^{cl}) \frac{\partial D_{ij}^{PF}}{\partial}] + \\ &\quad \sum_{i=1}^{ng-1} \sum_{j=i+1}^{ng} [(\delta_{ij} D_{ij}^{PF} \cos \delta_{ij}^u + C_{ij}^{PF} \sin \delta_{ij}^u) \cdot \\ &\quad (\frac{\partial \delta_i^u}{\partial} - \frac{\partial \delta_j^u}{\partial}) - (\delta_{ij} D_{ij}^{PF} \cos \delta_{ij}^{cl} + C_{ij}^{PF} \sin \delta_{ij}^{cl}) \cdot \\ &\quad (\frac{\partial \delta_i^{cl}}{\partial} - \frac{\partial \delta_j^{cl}}{\partial})] + \sum_{i=1}^{ng-1} \sum_{j=i+1}^{ng} D_{ij}^{PF} (\sin \delta_{ij}^u - \sin \delta_{ij}^{cl}) \cdot \\ &\quad [a_{ij} (\frac{\partial \delta_i^u}{\partial} - \frac{\partial \delta_j^{cl}}{\partial}) + b_{ij} (\frac{\partial \delta_i^u}{\partial} - \frac{\partial \delta_j^{cl}}{\partial})] \quad (6) \end{aligned}$$

式中: $a_{ij} = \frac{-2(\delta_i^u - \delta_j^{cl})}{(\delta_{ij}^u - \delta_{ij}^{cl})^2}$, $b_{ij} = \frac{2(\delta_i^u - \delta_j^{cl})}{(\delta_{ij}^u - \delta_{ij}^{cl})^2}$,

$$\frac{\partial C_{ij}^{PF}}{\partial} = E_i B_{ij}^{PF} \frac{\partial E_j}{\partial} + E_j B_{ij}^{PF} \frac{\partial E_i}{\partial},$$

$$\frac{\partial D_{ij}^{PF}}{\partial} = E_i G_{ij}^{PF} \frac{\partial E_j}{\partial} + E_j G_{ij}^{PF} \frac{\partial E_i}{\partial},$$

在式(6)中,需要确定 $\frac{\partial^{cl}}{\partial}, \frac{\partial^{cl}}{\partial}$, 也就是故障切除时刻的状态变量对控制变量的灵敏度。这可由运用“动态灵敏度方程组”而得到。该方程组系由在故障时的系统动态方程组通过考虑偏导数计算而求得,其偏导数的求解同式(6):

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial} = \frac{\partial}{\partial} \\ \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial} = -\frac{N}{M_i} \left[P_i - P_{ei}(t) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}(t) \right] \\ i = 1, 2, \dots, (ng - 1) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)为一组线性微分方程组,其节点导纳阵为故障时的收缩导纳阵,而每一时间步长的 \dot{u}_i 及 \dot{u}_i 已求得,它能够被积分。采用隐式梯形积分法可求得 $\frac{\partial^{cl}}{\partial}, \frac{\partial^{cl}}{\partial}$ 。其初值 $(\frac{\partial^{cl}}{\partial})_0 = \frac{\partial^s}{\partial}, (\frac{\partial^{cl}}{\partial})_0 = 0$ 。这里 \dot{u}_i^s 为故障前的稳定平衡点。 $\frac{\partial^s}{\partial}$ 的求解和主导不稳定平衡点的灵敏度 $\frac{\partial^u}{\partial}$ 的求解相同。

以主导不稳定平衡点为例,考虑对于故障后网络的动态灵敏度方程,在不稳定平衡点,状态变量 \dot{u}_i, \dot{u}_i 的导数为 0,则通过式(7)导致一线性代数方程组:

$$0 = -\frac{N}{M_i} \frac{\left[P_i - P_{ei}(t) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}(t) \right]}{\partial} \quad (8)$$

$i = 1, 2, \dots, (ng - 1)$

式中:角度为不稳定平衡点;导纳阵为故障后的收缩导纳阵。

将求得的 $\frac{\partial^{cl}}{\partial}, \frac{\partial^{cl}}{\partial}, \frac{\partial^u}{\partial}$ 代入式(6),可求得暂态能量裕度的灵敏度:

$$\frac{\partial T}{\partial} = H \quad (9)$$

2 计及暂态能量裕度约束 OPF线性规划模型

2.1 未计及暂稳约束的 OPF问题

未计及暂稳约束的 OPF问题是在满足一系列电力系统运行要求的约束下,寻找系统的最佳运行点,使得某一具体目标函数得到最优的结果。在系

统处于稳定状态时,可以建立如下的 OPF模型:

$$\begin{aligned} \min G(x, a) \\ \text{s t } f(x, a) = 0 \\ \underline{x} \leq x \leq \bar{x} \\ \underline{a} \leq a \leq \bar{a} \end{aligned} \quad (10)$$

其中: $G(x, a)$ 是目标函数,定义为全网发电机的耗量和; $f(x, a) = 0$ 表示等式约束,如潮流方程等; $\underline{x} \leq x \leq \bar{x}$ 表示状态变量上下限约束,如输电网络中的节点电压幅值等约束; $\underline{a} \leq a \leq \bar{a}$ 表示控制变量上下限约束,如发电机有功和无功出力等约束。

将等式约束即潮流方程线性化:

$$\frac{\partial f}{\partial} + \frac{\partial f}{\partial x} x = 0 \quad (11)$$

由式(11)得到控制变量和状态变量的线性关系式:

$$x = -\frac{\partial f^1}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial} = A \quad (12)$$

由式(10)和式(11)得到线性化的 OPF模型:

$$\begin{aligned} \min \frac{\partial G}{\partial a} a \\ \text{s t } \underline{x} \leq x_{\text{now}} + A \bar{x} \\ \underline{a} \leq a_{\text{now}} + a \bar{a} \end{aligned} \quad (13)$$

$x_{\text{now}}, a_{\text{now}}$ 是当前潮流下变量的实际值。

显然,对于该 OPF模型可以应用任何合适的线性规划方法求解。但是需要注意的是,由于该 OPF模型中不含有对暂态稳定约束的要求,因此最后得到的最优运行解在系统发生大扰动时不能可靠地保证系统暂态稳定。由于暂态失稳造成的损失及其高昂的控制费用,采取一定的预防措施是很有必要的,有必要建立计及暂态稳定约束的 OPF计算模型。

2.2 计及暂稳约束的 OPF问题

由 1.2 可知,在单故障情况下,要保持系统的暂态稳定性,必须满足不等式约束

$$T + H \geq 0 \quad (14)$$

式中: T 为当前运行状态下的暂态稳定裕度; H 为暂态稳定裕度对控制变量的灵敏度系数向量。

由式(13)和(14),暂态稳定约束的不等式能非常方便地加入标准的线性化 OPF模型:

$$\begin{aligned} \min \frac{\partial G}{\partial a} a \\ \text{s t } \underline{x} \leq x_{\text{now}} + A \bar{x} \\ \underline{a} \leq a_{\text{now}} + a \bar{a} \\ T^k + H^k \geq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

式中:上标 k 表示故障集合。

与标准的 OPF 模型相比,计及暂态稳定约束的 OPF 没有增加任何变量,在每一步的优化规模上也相差不大,对于单点故障情况,只是增加了一个不等式约束。因此任何可以用来求解线性 OPF 问题的方法(如单纯形法、内点法等)都可以方便地求解式(15)。本文采用单纯形方法求解。

而对于多故障情况,则考虑几个故障就要相应地加入几个不等式约束,只是在每一步迭代中就要计算多个能量裕度和多组灵敏度系数,加大了计算量。

3 算例分析

选择 WSCC 3 机 9 节点系统作为试验系统,该系统包括 3 台发电机、3 个负荷点、6 条传输线,系统接线图如图 1 所示。系统参数见文献 [4, 11]。所有参数均采用标么值表示,节点电压相角和发电机转角用弧度表示,基准功率为 100 MVA。为便于比较分析,我们采用以下 2 种优化方法:

- 1) 应用单纯形法求解不计及暂态稳定约束的 OPF 计算模型。
- 2) 应用单纯形法求解计及暂态稳定约束的 OPF 计算模型。

预想事故选择为:在线路 8-7 靠近节点 7 处发生三相接地短路,故障在 0.18 s 时由切除线路 8-7 而消除。在计算中,若暂态能量裕度 0,则认为系统能够在该扰动下保持暂态稳定,否则系统将在该扰动下失稳,优化结果见表 1。

图 2 为用 BPA 程序对两种方法得到的优化结果进行暂态稳定分析所得到的发电机 2 相对于发电机 1 的摇摆曲线,由图可知,方法 1 得到的结果在预想故障下发电机 2 和发电机 1 的角度偏差一直增大,很明显不能保持暂态稳定;而方法 2 得到的结果在预想故障下,第一个摇摆周期的最大角度偏差为 113.90° ;而以后的摇摆都比第一个摇摆小,因此方法 2 的优化结果满足暂态稳定要求。这说明了本文提出的模型是正确、有效的。

从表 1、2 中的数据可看出,如果在优化过程中不考虑暂态稳定约束,系统的总耗量值将降低到 34.932 1,在此种情况下,只要满足潮流方程的约束和静态约束,耗量特性低的发电机将尽可能多发有功,反之亦然,最后的优化结果有可能不满足暂态稳定约束,而本例中暂态稳定裕度降到了 -0.5,显然

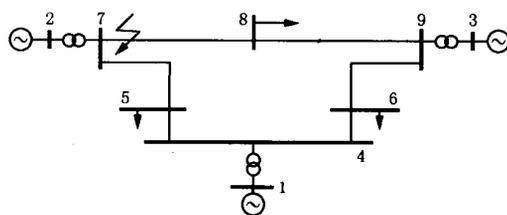


图 1 WSCC 3 机 9 节点系统接线图

Fig 1 Diagram of WSCC three-machine nine-bus system connection

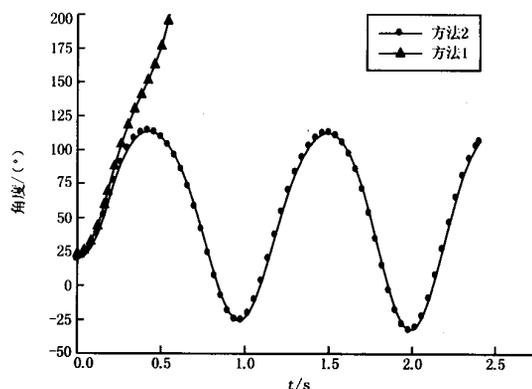


图 2 采用两种方法得到的发电机 2 相对于发电机 1 的摇摆曲线

Fig 2 Swing curves of generator 2 with regard to generator 1 by two methods

不能保持暂态稳定;而从方法 2 的优化结果可知,加入了暂态稳定约束后,系统的总耗量值只能降到 34.951 4,这虽然在一定程度上牺牲了系统运行的部分经济性,但是在预想事故发生时仍能保证系统运行的安全性和稳定性,在以经济性为目标满足安全稳定约束的条件下找到了一个合理的最优解。

而由表 3 可知,虽然基于 MOD 法进行稳定裕度的灵敏度计算时必须假定 CUEP 点不变,但在迭代过程中,每一步中的 CUEP 点是不同的。

表 1 优化后的变量值

Tab 1 Optimized variable values

变量	方法 1	方法 2	变量	方法 1	方法 2
P_1	0.3	0.382 7	V_1	1.10	1.085 7
P_2	1.92	1.739 0	V_2	1.076	1.1
P_3	0.990	1.082 7	V_3	1.094	1.090 2
Q_1	0.202	0.120 5	V_4	1.087	1.079 9
Q_2	0.101	0.100 4	V_5	1.057	1.058 5
Q_3	-0.2	-0.16	V_6	1.078	1.073 2
			V_7	1.084	1.098 6
			V_8	1.080	1.088 6
			V_9	1.10	1.1

表 2 优化后的目标函数和暂态能量裕度值

Tab 2 Values of optimized objective function and transient energy margin

目标函数	方法 1	方法 2
G	34 917 7	34 951 1
T	- 0 495 59	0 000 158 641

表 3 方法 2 的迭代过程中 CUEP 点和 T 的变化

Tab 3 Change of CUEP and transient energy margin during iteration by the second method

主迭代 顺序	CUEP 点 (转角)			T
	1 号机	2 号机	3 号机	
1	- 0 720 444	1 938 59	1 536 31	0 320 526
2	- 0 748 792	1 990 48	1 648 62	0 702 468
3	- 0 747 988	1 989 87	1 643 61	0 681 942
...
25	- 0 729 696	1 966 98	1 548 61	0 252 995
26	- 0 729 188	1 966 14	1 546 41	0 238 594
27	- 0 728 219	1 965 21	1 540 77	0 216 968
...
84	- 0 693 637	1 837 48	1 540 77	0 000 119
85	- 0 692 998	1 834 78	1 541 48	0 001 079
86	- 0 692 426	1 831 97	1 542 98	0 000 159

4 结论

本文建立了基于暂态能量函数法的 SCOPF 线性规划模型,并与单纯形法相结合形成了新的算法。通过对 WSCC 3 机 9 节点系统的计算分析,说明本文建立的计及暂稳约束的最优潮流的计算模型是合理的,且对于暂态稳定约束的加入并没有加大优化的规模,可以快速地求出满足经济性和稳定性的最优解。

参考文献:

- [1] Gan D, Thomas R J, Zimmerman R D. Stability-constrained Optimal Power Flow [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (2): 535-540.
- [2] Yue Y, Junji K, Hiroshi S. A Solution of Optimal Power Flow with Multicontingency Transient Stability Constraints [J]. IEEE Trans on Power Systems, 18(3): 1094-1102.
- [3] Chen L, Tada Y, Okamoto H, et al. Optimal Operation Solutions of Power Systems with Transient Stability Constraints [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 2001, 48(3): 327-339.
- [4] 刘明波,夏岩,吴捷. 计及暂态稳定约束的可用传输容量

量计算 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (9): 28-33.
L U Ming-bo, XIA Yan, WU Jie. Calculation of Available Transfer Capability with Transient Stability Constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (9): 28-33.

- [5] El-Kady M A, Tang C K, Carvalho V F, et al. Dynamic Security Assessment Utilizing the Transient Energy Function Method [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1 (3): 284-291.
- [6] Chiang H D, Wu F F, Varaiya P P. A BCU Method for Direct Analysis of Power System Transient Stability [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9 (3): 1194-1208.
- [7] Tong J Z, Chiang H D, Conneen T P. A Sensitivity-based BCU Method for Fast Derivation of Stability Limits in Electric Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8 (4): 1418-1428.
- [8] Vittal V, Zhou E Z, Hwang C, et al. Derivation of Stability Limits Using Analytical Sensitivity of the Transient Energy Margin [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4 (4): 1363-1372.
- [9] 刘笙,汪静. 电力系统暂态稳定的能量函数分析 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996.
L U Sheng, WANG Jing. Energy Function Analysis of Transient Stability in Power Systems [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1996.
- [10] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Theory and Analysis of Dynamic Power Systems [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [11] Anderson P M, Fouad A A. 电力系统的控制与稳定, 第一卷 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1979.
Anderson P M, Fouad A A. Power System Control and Stability, Vol I [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1979.

收稿日期: 2004-09-03; 修回日期: 2004-11-09

作者简介:

付钢 (1978 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统暂态稳定分析与最优潮流计算; E-mail: fugal1824@163.com

刘明波 (1964 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化计算与稳定性分析及电力市场。

Linear programming algorithm for optimal power flow problems incorporating transient energy margin constraint

FU Gang, L U Ming-bo

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(下转第 35 页 continued on page 35)

社, 1995.

CU I J in-tai An Introduction to Wavelets[M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 1995.

[9] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1991.

HE Jia-li, SONG Cong-ju The Theory of Relay Protection in Power System [M]. Beijing: China Water Power Press, 1991.

收稿日期: 2004-09-07; 修回日期: 2004-11-16

作者简介:

宋洪运 (1975 -),男,硕士研究生,主要从事小电流接地系统故障选线的研究; E-mail: fecshy@163.com

吕艳萍 (1955 -),女,副教授,主要从事电力系统继电保护及变电站综合自动化的研究;

夏云非 (1976 -),男,硕士研究生,主要从事电力系统技术的研究。

Research on fault line selection of single-phase grounding at two localities in power system with neutral unearthed

SONG Hong-yun, L üYan-ping, XIA Yun-fei
(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The paper analyzes the characteristics of zero-sequence current after single-phase grounding at two localities in power system with neutral unearthed. Based on the improvement of line selection of single-phase grounding at one locality, a method of fault line selection of single-phase grounding at two localities is presented. The method is to select the first line fault using the characteristics that the direction of transient zero-sequence current in the fault line are the most dissimilar to all non-fault lines when lines are fault, and the direction of transient zero-sequence current in all the lines are consistent when busbar fault occurs. It selects the second line fault by virtue of the character that zero-sequence current in fault line is stronger than that in non-fault lines after the first fault line is removed. Theoretical analysis and Matlab simulations show that the proposed method is suitable for various distribution systems with different grounding modes to select fault lines of single-phase earth faults at one or two localities. Moreover, it has a high reliability and strong anti-jamming ability.

Key words: power system with neutral unearthed; two localities; wavelet packet; fault line selection; direction

(上接第 7页 continued from page 7)

An approach for the allocation of reactive power sources by using voltage deviation with small disturbance

CAO Li-xia¹, LI Ji-wen¹, CHENG Xin-gong², JU Xin³, ZHANG Yong²

(1. Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Jinan University, Jinan 250022, China;
3. Tancheng Electric Power Bureau, Tancheng 276100, China)

Abstract: This paper proposes an approach for the allocation of reactive power sources by using voltage deviation with small disturbance. Taking account of different operating conditions, the buses with big average voltage deviation are selected as compensation sites according to the principle of reactive power compensation on site after small disturbance occurs. The simulation results on IEEE118 buses system verify that the selected compensation sites, which locate near load centers or far away from generators, have a good robustness and can decrease power loss efficiently.

Key words: reactive power compensation; allocation of reactive power sources; voltage deviation; Greedy algorithm

(上接第 16页 continued from page 16)

Abstract: This paper proposes a linear programming model of optimal power flow (OPF) problems incorporating transient stability constraints. The linear relation between the increments of transient stability margin and control variables is expressed by analytical sensitivity method of transient energy margin, and the transient stability constraint is explicitly described and can be incorporated into conventional linearized OPF model as inequation constraints. The simple algorithm is applied to solve this model. The results on WSCC three-machine nine-bus test system show that this model can maintain transient stability, and effectively handle the combination of operation economy and security.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50277013).

Key words: optimal power flow; controlling unstable equilibrium point; transient stability; sensitivity analysis; linear programming