基于轨迹灵敏度的暂态稳定约束最优潮流计算①

刘明波[1], 李妍红[1,2], 陈家荣[2]
(1.华南理工大学电力学院, 广州 510640; 2.香港理工大学电机工程系, 香港)

摘要: 为将暂态稳定约束最优潮流问题转化为最优潮流和暂态稳定两个子问题,根据暂态稳定计算结果求出发电机转角及转速相对于机械输入功率的轨迹灵敏度。基于轨迹灵敏度,计算出在最领先发电机和最落后发电机之间转移的有功功率,据此修改其在最优潮流模型中的有功功率上下限,从而实现两个子问题的交替求解。并且推导出准确的轨迹灵敏度及初值计算公式,利用上述公式,得更小的转移功率值,从而使功率转移后系统的优化程度更高。同时在惯性中心坐标下采用最大转角判据找出最领先机和最落后机,并以3机9节点和10机 39节点系统为例,验证了该方法的可行性。

关键词: 暂态稳定; 最优潮流; 轨迹灵敏度
中图分类号: TM 744 文献标识码: A 文章编号: 1003-8930(2007)06-0024-06

Transient Stability Constrained Optimal Power Flow Using Trajectory Sensitivities

LIU Ming-bo[1], LI Yan-hong[1,2], CHAN K W[2]
(1. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: Transient stability constrained optimal power flow (TSC-OPF) problem is divided into two sub-problems, which are optimal power flow (OPF) and transient stability control. Trajectory sensitivities of both velocities and rotor angles of generators with respect to their mechanical input power are calculated according to the results of transient stability simulation. Shifting active power between the most critical machine and the least critical one to regain transient stability is obtained according to trajectory sensitivities, based on which upper and lower active power limits of generators in OPF model are modified and thus OPF problem and transient stability control can be performed iteratively. Accurate expressions of trajectory sensitivities and their initial values have been derived instead of using approximate ones by which smaller shifting active power can be obtained and thus a more optimal operation point of power system can be given. A biggest rotor angle criterion under the center of inertia reference frame is used to determine critical order of generators. Furthermore, results obtained from 3-machine 9-bus system and 10-machine 39-bus system validate the proposed method.

Key words: transient stability; optimal power flow (OPF); trajectory sensitivity

1 前言

电力系统暂态稳定分析方法通常分为两大类: 第一类为时域仿真法,通过求解微分-代数方程组获得发电机的运动轨迹[1,2]; 另一类为直接法,通过构造暂态能量函数,从系统能量的角度去分析稳定问题[3]。近年来相继提出了基于上述两类算法的改进算法,如文献[4]基于发电机双向模块简

① 收稿日期: 2006-08-15; 修回日期: 2007-01-12
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50277013); 香港特别行政区 RGC项目(PolyU5200103E)

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

化,提出了一种改进的电力系统轨迹仿真的新算法。在领先机群和落后机群之间进行功率转移,即减少领先机群的有功输出,其减少部分由落后机群来承担,使不稳系统保持稳定[5]。灵敏度分析方法在暂态稳定控制中的应用主要有两条思路: 一是与直接法相结合,利用能量裕度函数的灵敏度进行功率转移控制[6,7];二是将灵敏度分析与时域仿真法相结合,用轨迹灵敏度来实现功率转移[8~11]。文献[12, 13]将暂态稳定约束最优潮流问题(transient stability constrained optimal power flow, TSC-OPF)转化为最优潮流和暂态稳定两个子问题,并进行交替计算,同时提出了最优转移功率的求取方法。

本文沿着文献[10, 11]的思路,通过时域仿真法求解暂态稳定子问题;根据暂态稳定计算结果求出发电机转角及转速度相对于机械输入功率的轨迹灵敏度;利用所算得的轨迹灵敏度,计算最领先发电机和最落后机之间转移的有功功率,据此修改最优潮流模型中的有功功率上下限,实现两个子问题的交替求解。重新推导了准确轨迹灵敏度及初值计算公式,并用其取代以往轨迹灵敏度计算中采用的近似假定[7~10],求得的灵敏度与近似计算的结果相比更准确,最优潮流 OPF计算结果更好。

2　数学模型

2.1　轨迹灵敏度的定义

电力系统的动态过程可用一组微分-代数方程来描述,即

$$\dot{x} = f(x, y, \lambda) \quad x(t_0) = x_0 \tag{1}$$

$$0 = g(x, y, \lambda) \quad y(t_0) = y_0 \tag{2}$$

式中: x为状态变量(如发电机的转角和转速);y为代数变量(如节点电压的幅值及相角);λ为系统参数(如发电机的机械输入功率)。

轨迹灵敏度($\partial\dot{x}/\partial\lambda$和 $\partial y/\partial\lambda$)定义[6,7,10]为

$$\frac{\partial\dot{x}}{\partial\lambda} = f_x(x, y, \lambda)x_\lambda + f_y(x, y, \lambda)y_\lambda + f_\lambda(x, y, \lambda) \tag{3}$$

$$0 = g_x(x, y, \lambda)x_\lambda + g_y(x, y, \lambda)y_\lambda + g_\lambda(x, y, \lambda) \tag{4}$$

在文献[7~10]中,将轨迹灵敏度变量的初值近似为 $x_\lambda(t_0) = 0, y_\lambda(t_0) = 0$,并假定 $g_y(\cdot)$非奇异。实际上,可以很方便、准确地推导出代数变量的轨迹灵敏度 $y_\lambda(\cdot)$的表达式和状态变量轨迹灵敏度 $x_\lambda(t_0)$的初值,上式中的 0均表示零向量。

2.2　轨迹灵敏度及变量初值的计算公式

在本文中,同步发电机采用二阶经典模型,λ为发电机的机械输入功率,其他系统参数视为定值。由式(3)、(4)可得第 i台发电机的转角和转速度相对第 k台发电机的机械输入功率 P_k的灵敏度方程为

$$\frac{\partial\dot{W}}{\partial P_k} = \frac{\partial\dot{k}_i}{\partial P_k} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} M_i\frac{\partial\dot{k}_i}{\partial P_k} = &-\sum_{j=1, j\neq i}^{n}[E_iE_jB_{ij}\cos W_{ij} - E_iE_jG_{ij}\sin W_{ij}](\frac{\partial W_i}{\partial P_k} - \frac{\partial W_j}{\partial P_k}) - \\ &\sum_{j=1, j\neq i}^{n}[(B_{ij}\sin W_{ij} + G_{ij}\cos W_{ij})(\frac{\partial E_i}{\partial P_k}E_j + \frac{\partial E_j}{\partial P_k}E_i)] - 2E_i\frac{\partial E_i}{\partial P_k}G_{ii} + \frac{\partial P_i}{\partial P_k} \end{aligned} \tag{6}$$

式中: $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$为收缩到发电机内电势节点的导纳矩阵中第 i行第 j列的元素;M_i为第 i台发电机的惯性时间常数;W_i和 W_j分别为第 i和第 j台发电机的转子转角,$W_{ij} = W_i - W_j$;E_i和 E_j分别为第 i和 j台发电机内节点电势,即为在此所讨论的代数变量。$\partial P_i/\partial P_k$的值和 $\partial\dot{k}_i/\partial P_k$的初值分别为

$$\frac{\partial P_i}{\partial P_k} = \begin{cases} 1 & i = k \\ 0 & i \neq k \end{cases} \tag{7}$$

$$\frac{\partial\dot{k}_i}{\partial P_k}(t_0) = 0 \tag{8}$$

在故障前期间,发电机的机械输入功率等于电磁输出功率,即

$$P_i = P_{ei} = \frac{E_iV_i}{x'_{di}}\sin(W_i - \theta_i) \tag{9}$$

式(9)中的各变量的定义如图 1所示。

图 1中,j表示虚部,在本文其他地方,j表示变量。节点 1即为通常所说的发电机内节点,节点 2为发电机端节点。x'_{di}为第 i台发电机的 d轴暂态电抗,P_{ei}为第 i台发电机的电磁输出功率。

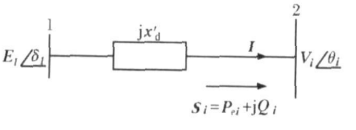

图 1　发电机等值电路

Fig. 1　Equivalent circuit of a generator

首先,推导 $\partial E_i/\partial P_k$的表达式。$k \neq i$时,$\partial E_i/\partial P_k = 0$,因此只需求 $\partial E_i/\partial P_i$即可。同时对式(9)两端求 P_i的偏导得

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$1 = \frac{\partial E_i}{\partial P_i} \cdot \frac{V_i}{x_{di}} \cdot \sin(W - \theta_i) + \frac{E_i V_i}{x_{di}} \cdot \cos(W - \theta_i) \cdot \frac{\partial W}{\partial P_i} + \frac{\partial V_i}{\partial P_i} \cdot \frac{E_i}{x_{di}} \cdot \sin(W - \theta_i) - \frac{E_i \cdot V_i}{x_{di}} \cdot \cos(W - \theta_i) \cdot \frac{\partial \theta_i}{\partial P_i} \quad (10)$$

则 $\partial E_i / \partial P_k$ 的求取转化为求 $\partial V_i / \partial P_i$ 和 $\partial \theta_i / \partial P_i$。故障前的网络方程为

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{Y}\boldsymbol{V} \quad (11)$$

其中,第 i 个方程展开为

$$\dot{I}_i = \sum_{i=1}^{n} \dot{Y}_{ij} \dot{V}_j \quad (12)$$

由式(12)可得

$$P_i = P_{ei} = \dot{V}_i I_i = \dot{V}_i \sum_{i=1}^{n} Y_{ij} V_j = V_i^2 G_{ii} + \dot{V}_i \sum_{j=1, j \neq i}^{n} \dot{V}_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) \quad (13)$$

对式(13)两边求偏导可得

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2V_i G_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^{n} V_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) \quad (14)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = V_i \sum_{j=1, j \neq i}^{n} V_j (-G_{ij} \sin\theta_{ij} + B_{ij} \cos\theta_{ij}) \quad (15)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial P_i} = 1 / \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial P_i} = 1 / \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \quad (17)$$

式中: V_i、θ_i 和 W 为故障前系统正常运行状态下 OPF解; G_{ij} 和 B_{ij} 为故障前系统的参数; $\frac{\partial P_i}{\partial V_i} \neq 0$, $\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \neq 0$[14]。

式(9)两边同时对 W 求偏导,在 t_0 时刻,有

$$\frac{\partial P_i}{\partial W_i}(t_0) = \frac{E_{i0} V_{i0}}{x_d} \cos(W_0 - \theta_{i0}) \quad (18)$$

$$\frac{\partial W_i}{\partial P_j}(t_0) = \begin{cases} 1 / (\frac{E_{i0} V_{i0}}{x_d} \cos(W_0 - \theta_{i0})), & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (19)$$

利用式(19)可准确求得轨迹灵敏度状态变量的初值。再将式(14)、(15)及(19)代入式(10),则可准确得到 $\frac{\partial E_i}{\partial P_i}$。同时求解式(1)~(4),并利用求 $\partial E_i / \partial P_k$ 的计算公式和轨迹灵敏度状态变量的准确初值即可求得轨迹灵敏度。

2.3 最优潮流模型

$$\min C(P_g) \quad (20)$$

$$\text{s.t. } \boldsymbol{h}_1(x, y, \lambda) = 0 \quad (21)$$

$$\boldsymbol{h}_2(x, y, \lambda) \leqslant 0 \quad (22)$$

式中: $C(\cdot)$ 为费用函数; P_g 为发电机有功输出功率; 式(21)为等式约束,即潮流方程; x、y 及 λ 与1.1节中的定义相同; 式(22)为不等式约束,包括发电机的有功和无功输出功率上下限。本文通过调节发电机的有功输出功率上下限,使得发电机运行在暂态稳定域内[12]。

$$P_g^{\min} \leqslant P_g \leqslant P_g^{\max} \quad (23)$$

2.4 发电机临界程度排序和转移功率计算

在采用绝对坐标时,可能出现某台发电机与最落后机之间的相对转角在某时步超过 180° 时,即被判为最领先机,但实际上,继续仿真发现其相对转角仍可能减小,真正失稳的为另一台机; 即使进行了功率转移,真正会失稳的发电机并未得到控制。采用惯性中心(center of inertia reference frame, COI)坐标将可避免这一情况。在 COI坐标系下,根据式(24)~式(26)计算 θ_i,并按照发电机临界程度进行排序。最大的 θ_i 值代表最领先机,最小的 θ_j 值代表最落后机。

$$W_{COI} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^{n} M_i W_i \quad (24)$$

$$M_T = \sum_{i=1}^{n} M_i \quad (25)$$

$$\theta_i = W_i - W_{COI} \quad (26)$$

$$\Delta P_{i,j} = (W_j - W_j^0) / \frac{\partial W_j}{\partial P_i} \quad (27)$$

最领先机 i 和最落后机 j 之间的功率转移值可由式(27)计算求得。式中 W_j^0 代表的是每次由最优潮流(隐含地考虑了暂态稳定约束)计算出来的初始运行点[12]。若要更准确地计算最优转移功率,可以采用其他方法,见文献[13]。

3 算法流程

整个计算包括以下步骤:

第 1步 形成原始导纳矩阵,给定故障。

第 2步 求解最优潮流模型式(20)~(22),获得运行点; 在每一个新的 OPF运行点,重新计算负荷的等效阻抗,并修改原始导纳矩阵及给定故障下的故障中和故障后的收缩前导纳矩阵,形成新的收缩到发电机内节点的故障前、故障中和故障后导纳矩阵,用于第 3步中的暂态稳定仿真。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

第 3步　根据最优潮流解,在特定故障下根据式(1)~(2)计算系统运动轨迹并存储;在 COI 坐标下找出每时步的最领先机 i 和最落后机 j,判断 $\theta_i = W - W_{COI}$ 是否大于 180°,若大于 180°,则认为系统失去稳定,转至第 4步,同时存储仿真所用时间;否则判断积分时间到否,如积分时间未到,则重复第 3步,若积分时间到,结束计算,输出结果。

第 4步　根据第 3步中所算得的每时步的系统运动轨迹,利用式(3)、式(4)和第 1.2节中准确推导的初值及 $\partial E_i / \partial P_k$ 的计算式,计算每时步轨迹灵敏度。判断是否已到第 3步中暂态仿真所用的时间,若到,则跳转至第 5步,否则重复第 4步计算。

第 5步　根据最领先发电机 i 和最落后机 j 之间的相对转子角相对于最领先机有功输出 P_i 的轨迹灵敏度 $\partial W_j / \partial P_i$,利用式(27)即可计算得到需从 i 转移到 j 的有功功率 ΔP_{ij};利用第 4步中计算出的 ΔP_{ij} 修改最优潮流模型中第 i 和第 j 台发电机的有功输出功率的上下限分别为

$$P_i^{new} = P_i^0 - \Delta P_{i,j} \tag{28}$$

$$P_j^{new} = P_j^0 + \Delta P_{i,j} \tag{29}$$

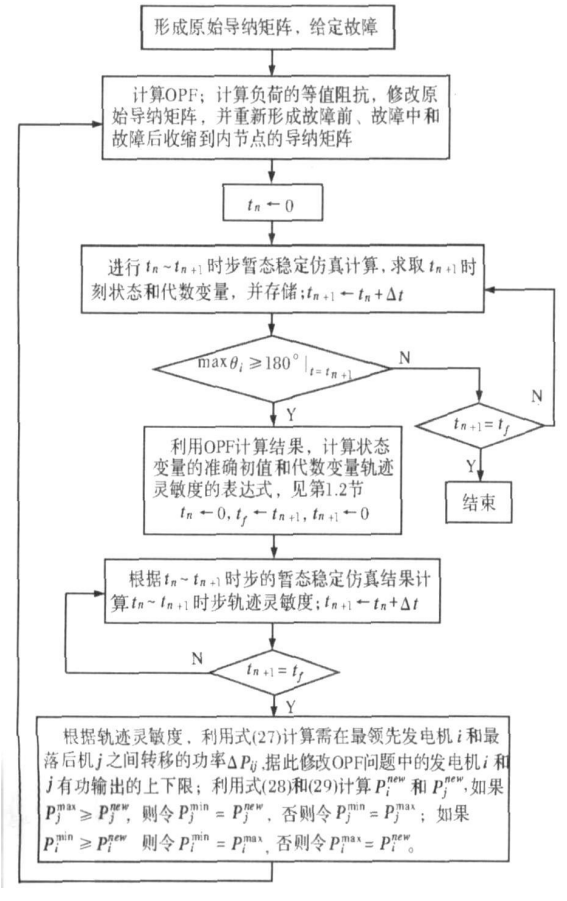

图 2　计算流程图

Fig. 2　Computation flow chart

式中: P_i^0 和 P_j^0 分别为发电机 i 和 j 的初始有功输出功率;W_j 为发电机 i 和 j 之间的相对转角的初始值,它们均为该次循环中第 2步所求得的最优潮流解;修改发电机有功输出的上下限 P^{max} 和 P^{min},若在功率转移后,最落后机 j 超过其有功输出上限 P_j^{max},则剩余有功功率将在最领先机和次最落后机之间进行转移,并以此类推,次最落后机若仍不能提供足够功率,则落后机将再次参与转移,返回第二步,计算流程如图 2所示。

需要指出的是,轨迹灵敏度应与系统的运动轨迹同时计算。但先判断暂态稳定,并存储计算结果,若失稳,再利用每时步的仿真结果计算轨迹灵敏度,可节约系统稳定时计算轨迹灵敏度所花费的时间。因为系统稳定时,并不需要计算轨迹灵敏度来进行功率分配,而轨迹灵敏度计算是整个计算流程中花费时间最多的部分。

4　算例分析

以 3机 9节点[15]和 10机 39节点[12]系统为例,验证本文所提出方法的可行性。同步发电机采用二阶经典模型,负荷采用恒阻抗模型,最优潮流用 Matpower 3.0[17]计算,其中费用函数同文献[12]。同时,对利用 1.2节所推导轨迹灵敏度的计算结果与采用近似假设的计算结果进行对比分析。

4.1　3机 9节点系统

在初始 OPF计算后,系统在节点 7处发生三相短路故障,t_{cl} = 0.35 s时,通过切除线路 7-5排除故障,系统将失去暂态稳定。2号机和 1号机分别为最领先机和最落后机。表 1给出初始 OPF计算后发电机费用及功率。

表 1　3机系统初始 OPF计算后发电机费用及功率

Tab. 1　Cost and power output of generators after initial OPF calculation in 3-machine system

发电机编号	额定功率 / MW	费用函数 / ($ · h⁻¹)	优化结果	
			功率 / MVA	总费用 / ($ · h⁻¹)
1	200	$0.006\,0P^2 + 2.0P + 140$	105.47 + j12.18	
2	150	$0.007\,5P^2 + 1.5P + 120$	113.10 − j1.52	1131.14
3	100	$0.007\,0P^2 + 1.8P + 80$	99.33 − j22.74	

计算中采用第 1.2节中轨迹灵敏度状态变量的准确初值和代数变量的计算公式,由式(27)可算得,需从 2号机转移至 1号机的有功功率 $\Delta P_{1,2}$ 为 54.115 0 MW。进行第一次功率转移后,系统在新的运行点能保持暂态稳定,图 3给出了第二次优

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

化后发电机相对转角曲线图。表 2同时列出采用第 1.2节中的轨迹灵敏度准确计算公式和用近似假设[10,11]的优化结果。采用近似假设: $x_\lambda(t_0) = 0$, $y_\lambda(t_0) = 0$, $\partial E_i/\partial P_k = 0$, $\partial W_i/\partial P_k = 0$, $\partial k_i/\partial P_k = 0$, 则 $\Delta P_{1,2} = 60.5740$ MW。可见采用准确计算公式,得到的转移功率值更小一些。从表 2可以看出,采用近似值计算的优化结果较之采用准确计算的结果经济性稍差,然而后者在较小的功率转移值之下,也能保持暂态稳定,如图 3所示。

表 2 采用两种方法第一次功率转移和 OPF计算后的优化结果

Tab. 2 Results after the first power shifting and OPF calculation by two methods

发电机编号	本文方法		文献[12]的方法	
	负荷/MVA	总费用/($·h-1)	功率/MVA	总费用/($·h-1)
1	159.58+j13.21		166.04+j13.91	
2	58.99-j2.94	1 172.92	52.53-j3.32	1 183.49
3	98.87-j20.43		98.90-j19.49	

4.2 10机 39节点系统

在初始 OPF计算后,当系统在节点 17处发生三相短路故障,$t_d = 0.2$ s时切除线路 17-18排出故障,系统将失去暂态稳定。5号机和 10号机分别为最领先机和最落后机。表 3给出了初始 OPF计算后发电机费用及功率。采用 1.2节中轨迹灵敏度的准确计算公式时,由式(27)算得需从 5号机转移至 10号机的有功功率 $\Delta P_{5,10}$ 为 206.2696 MW。进行第一次功率转移后,系统在新的运行点,能保持暂态稳定,图 4给出了第二次优化后发电机相对转角曲线。采用近似初值计算得到的转移功率 $\Delta P_{5,10} = 323.4281$ MW。表 4同时列出采用第 1.2节中准确计算和近似计算轨迹灵敏度的优化结果。类似地,采用准确计算时其结果更好一些。

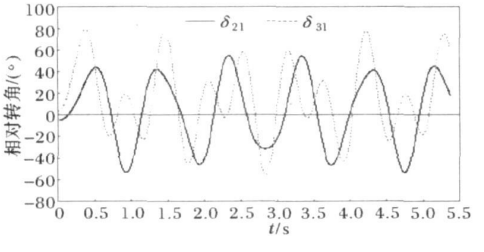

图 3 3机系统中发电机相对 1号机的相对转角曲线

Fig. 3 Swing curves of relative rotor angle of generators with respect to generator 1 in 3-machine system

综合两个系统的计算结果,不难看出,采用近似初值的计算结果更趋于保守,即所算的功率转移值更大,因此功率转移后的优化结果经济性较差;若采用本文所推导的轨迹灵敏度状态变量的准确初值和代数变量的计算公式时,所得的功率转移值更为准确,数值更小,因此功率转移后的优化结果经济性也更好。同时,从图 3和图 4可以看到,基于利用准确初值计算的灵敏度,系统在功率转移后能保持较好的暂态稳定性。由此表明了采用轨迹灵敏度状态变量的准确初值和代数变量的计算公式,对于求取准确的转移功率及充分保证电力系统运行的安全性和经济性具有较大意义。

表 3 10机系统初始 OPF计算后发电机费用及功率

Tab. 3 Cost and power of generators after initial OPF calculation in 10-machine system

发电机编号	额定功率/MW	费用函数/($·h-1)	功率/MVA	总费用/($·h-1)
1	350	$0.019\,3P^2+6.9P$	244.80-j65.55	61 755.15
2	650	$0.011\,1P^2+3.7P$	571.11+j363.48	
3	800	$0.010\,4P^2+2.8P$	647.28+j246.52	
4	750	$0.008\,8P^2+4.7P$	636.73+j113.26	
5	650	$0.012\,8P^2+2.8P$	513.27+j141.31	
6	750	$0.009\,4P^2+3.7P$	656.01+j221.59	
7	750	$0.009\,9P^2+4.8P$	563.34+j57.86	
8	700	$0.011\,3P^2+3.6P$	538.94+j43.88	
9	900	$0.007\,1P^2+3.7P$	836.07+j26.40	
10	1200	$0.006\,4P^2+3.9P$	984.31+j61.54	

表 4 10机系统两种方法第一次功率转移和 OPF计算后的优化结果

Tab. 4 Results after the first power shifting and OPF calculation by two methods

发电机编号	本文方法		文献[12]的方法	
	功率/MVA	总费用/($·h-1)	功率/MVA	总费用/($·h-1)
1	242.29-j69.53	62 617.1	350.00-j51.91	63 700.1
2	567.13+j358.92		565.02-j357.29	
3	643.71+j231.80		641.68-j226.30	
4	642.78+j127.74		645.55-j139.35	
5	307.00+j109.70		189.85-j105.45	
6	656.84+j216.57		656.61-j214.01	
7	564.14+j56.61		563.9-j56.33	
8	537.94+j42.52		541.48-j44.10	
9	835.20+j26.66		833.58-j26.23	
10	1 190.58+j55.70		1 200.00-j56.80	

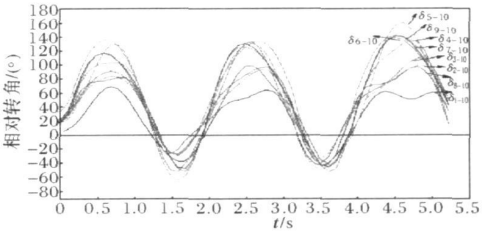

图 4 10机系统中发电机相对 10号机的相对转角曲线

Fig. 4 Swing curves of relative rotor angle of generators with respect to generator 10 in 10-machine system

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5 结论

1) 把最优潮流和暂态稳定问题分开计算,将大大降低计算量,并能同时考虑安全性和经济性。

2) 引入轨迹灵敏度对发电机有功输出进行再分配,可以有效地实现暂态稳定的预防控制。采用推导的轨迹灵敏度的计算公式,计算得到的功率转移结果比采用近似初值的计算结果更为准确,数值上更小,OPF计算结果更好。

3) 在 COI坐标下,能够可靠地判断领先机和最落后机,避免了领先机的错误判断所带来的施加控制后仍不能使系统稳定的情况。

参考文献:

[1] Iavernaro F, La Scala M, Mazzia F. Boundary values methods for time-domain simulation of power system dynamic behavior [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-Part I: Fundamental Theory and Applications, 1998, 45(1): 50- 63.

[2] 吴政球,曾少军 (Wu Zhengqiu, Zeng Shaojun). 基于时域仿真的暂态稳定裕度及其灵敏度解析分析 (Power system transient stability and analytical sensitivity analysis based on time domain simulation) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSA), 2001, 13(6): 4- 7.

[3] Fouad A A, Vittal V. Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method [M]. Englewood Cliffs (NJ, USA): Prentice Hall, 1992.

[4] 李传栋,房大中,杨晓东 (Li Chuandong, Fang Dazhong, Yang Xiaodong). 改进的暂态稳定双向模块简化仿真算法 (Improved transient stability simulation based on bidirectional module reduction) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSA), 2005, 17(1): 1- 5.

[5] Fouad A A, Jianzhong T. Stability constrained optimal rescheduling of generation [J]. IEEE Trans on Power System, 1993, 8(1): 105- 112.

[6] 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 System, 1989, 4(4): 1363- 1372.

[7] Shubhanga K N, Kulkarni A M. Stability-constrained generation rescheduling using energy margin sensitivities [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1402- 1413.

[8] Hiskens I A, Pai M A. Trajectory sensitivity analysis of hybrid systems [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-Part I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 47(2): 204- 220.

[9] Laufenberg M J, Pai M A. A new approach to dynamic security assessment using trajectory sensitivities [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 953 - 958.

[10] 周鲲鹏,陈允平 (Zhou Kunpeng, Chen Yunping). 运用轨迹灵敏度的电力系统动态安全控制 (Power system dynamic security control based on trajectory sensitivity) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2003, 27(12): 46- 50.

[11] 孙景强,房大中,周葆荣 (Sun Jingqiang, Fang Dazhong, Zhou Baorong). 基于轨迹灵敏度的电力系统动态安全预防控制算法研究 (Study on preventive control algorithm for dynamic security of power system based on trajectory sensitivity method) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2004, 28(21): 26- 30.

[12] Nguyen T B, Pai M A. Dynamic security-constrained rescheduling of power systems using trajectory sensitivities [J]. IEEE Trans on Power System, 2003, 18(2): 848- 854.

[13] 孙景强,房大中,钟德成 (Sun Jingqiang, Fang Dazhong, Zhong Decheng). 暂态稳定约束下的最优潮流 (Optimal power flow with transient stability restraints) [J]. 中国工程电机学报 (Proceedings of the CSEE), 2005, 25(12): 12- 17.

[14] 西安交通大学高等数学教研室. 高等数学上 [M]. 1版,北京: 人民教育出版社, 1979.

[15] Anderson P M, Fouad A A. Power System Control and Stability [M]. Ames (IA, USA): The Iowa State University Press, 1977.

[16] Padiyar K R. Power System Dynamics: Stability and Control [M]. Vol. I, Bangalore, India: Interline Pub, 1996.

[17] Zimmeraman R, Gan D. MATPOWER: A MATLAB Power System Simulation Package [EB/OL]. http://www.pserc.cornell.edu/matpower

作者简介:

刘明波 (1964-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统优化、运行与控制。 Email: epmbliu@scut.edu.cn

李妍红 (1982-),女,硕士研究生,研究方向为最优潮流与暂态稳定预防控制。 Email: yaoyao_lyh@163.com

陈家荣 (1966-),男,博士,助理教授,研究方向为电力系统中安全与稳定评估、实时电力系统仿真、分布式与并行处理。 Email: eekwchan@polyu.edu.hk

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net