

· 自动化技术 ·

基于能量函数的电网暂态稳定性离线量化指标研究

刘群英¹, 刘起方², 刘 登³, 廖永锋¹

(1. 电子科技大学自动化工程学院 成都 611731; 2. 中国国电集团四川公司阿水电力开发有限公司 成都 610021;

3. 四川省电力公司资阳公司 四川 资阳 641316)

【摘要】基于李亚普罗夫直接法的能量裕度一直被认为是评价电力系统暂态稳定性的一个重要指标, 而能量裕度一直是在线应用关注的重点。该文首先结合经典的电力系统转子运动方程, 构建了暂态能量函数模型, 然后分析了稳定域基本特征及其与电力系统势能边界的对应关系, 并采用二次扰动与基于势能边界特性的插值法相结合的思路获取势能最大值, 最后基于势能最大值构建了电网暂态稳定性量化指标。通过在三机系统和IEEE-30母线系统的系列仿真结果及其与CUEP法的对比, 验证了该方法能够提高计算速度和计算精度, 可用于电力系统暂态稳定性的离线评估。

关键词 能量裕度; 稳定域; 二次扰动; 暂态稳定性

中图分类号 TM7

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2015.05.012

Energy-Based Research on Grid Transient Stability Off-Line Quantification Index

LIU Qun-ying¹, LIU Qi-fang², LIU Deng³, and LIAO Yong-feng¹

(1. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. China Guodian Sichuan Ashine Power Co. Ltd Chengdu 610021;

3. Ziyang Company of Sichuan Electrical Power Company Ziyang Sichuan 641316)

Abstract Energy margin based on Lyapunov direct method has been considered as an important index to quantify the transient stability of power system. Especially its on-line application has been focus of attention. Based on the classical equations of rotor motion, the transient energy function model is first established in this paper. Then the converting relationship between the potential energy boundary surface and the stability region characteristics is described. Based on these, the second kick method and the interpolation method based on the property of potential energy boundary are combined to calculate the maximum of the potential energy. At last, the energy margin model is established based on the maximum of potential energy and the transient energy. The simulation results in three-machine and IEEE-30 bus system and the comparison with CUEP verify the effectiveness and feasibility of the proposed method, which can be used in off-line assessment of transient stability of power system.

Key words energy margin; stability region; the second kick; transient stability

随着电力系统暂态稳定性评估要求的提高, 电网暂态稳定性评估理论与方法的研究, 除了要给出系统暂态稳定性的定性结论外, 还需要对稳定程度甚至发展趋势进行量化分析。从近年国内外该方向的研究发展过程来看, 主要是基于量化指标模型的构建评估其暂态稳定性程度和发展趋势。而关于量化指标模型的构建理论和方法, 迄今为止, 也取得了不少的成果, 其研究思路主要集中在两类: 不确定性分析方法和确定性分析方法。

不确定性分析方法基于随机理论^[1-2]和概率分布^[3-4]。确定性分析方法主要有基于支持向量机的方法^[5-6]、回归法^[7]、用于搜索多摆暂态稳定约束的灵敏性法^[8]、解轨迹跟踪法^[9]、修正的直流潮流法^[10]和能量函数法^[11-15]。作为确定性分析法重要分支的直接法, 其研究在20世纪60—90年代期间最为活跃, 所取得的成果为其后来在暂态稳定性中的实际应用奠定了坚实理论基础。直接法及其基础上发展的能量函数法依然是暂态稳定性研究所依赖的主要方

收稿日期: 2014-07-09; 修回日期: 2015-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(51007006); 中国博士后面上基金(2015M572457)

作者简介: 刘群英(1977-), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力系统稳定与控制分析方面的研究。

法。文献[11-14]基于能量函数,从不同的角度进行了暂态稳定性的机理及评估指标研究。文献[11]构造了基于联络线的能量函数,并将能量分解为振荡分量和准稳态分量,从而对多重扰动引起的系统低频振荡进行分析。文献[12]利用转子加速度方程得到等效单机无穷大系统,以此构造等效暂态能量函数,有利于简化运算。文献[13]针对支路势能边界方法的不足,推导了电力系统暂态稳定及临界割集识别判据。文献[14]基于势能变化,使用了临界发电机母线对的相角差监测暂态稳定裕度。文献[15]基于Lyapunov直接法,应用了正定多项式、半正定程序以及平方解耦的和处理具有多项式向量场的系统暂态稳定性。

为了提高暂态稳定性计算效率,并行计算的思路近年被提出。文献[16]将 s 级 $2s$ 阶的辛龙格-库塔-奈斯通法用于经典模型的电力系统暂态稳定性计算,利用矩阵分裂技巧以及矩阵求逆运算的松弛法,推导了暂态稳定性并行算法。文献[17]通过全牛顿迭代、基于稀疏矩阵的线性求解器求解并行结构的多图像处理单元,加速大规模电力系统暂态仿真计算。

以上研究为进一步研究电力系统暂态稳定性的计算速度和精确性的提高方法提供了理论支撑。然而,在电力系统发展的新形势下,现有的电力系统暂态稳定性的评估,因其在结合实际系统物理特性方面的不足而受到局限,更快速、更简便的评估方法依然是电力运行人员关注的重点。

本文基于经典的发电机转子运动方程和功率平衡方程,构建了暂态能量函数模型;基于电力系统动能和势能的转换关系及稳定域基本特征,采用二次扰动法与插值法相结合来获取势能最大值;基于势能最大值构建了电网暂态稳定性评估指标。在三机系统和IEEE-30母线系统中的仿真结果及其与CUEP方法的对比分析,验证了方法的有效性和可行性。

1 能量函数模型构建

单机无穷大系统的接线如图1所示。

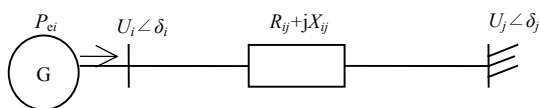


图1 单机无穷大系统

系统受到扰动时,发电机转子运动方程为:

$$\delta_i = \omega_i \quad (1)$$

$$M_i \ddot{\delta}_i = P_{mi} - P_{ei} \quad (2)$$

式中, δ_i 、 ω_i 分别为发电机的转子角和转速; P_{mi} 、 P_{ei} 分别为发电机的机械功率和电磁功率; M_i 为惯性时间常数。式(2)中,令:

$$f_i(\delta_i) = P_{mi} - P_{ei} \quad (3)$$

根据李亚普罗夫直接法,由式(1)、式(3)可得发电机的能量函数表达式为:

$$E_i = \frac{1}{2} M_i \omega_i^2 - \int_{\delta_i^s}^{\delta_i} f_i(\delta) d\delta \quad (4)$$

设:

$$E_{kei} = \frac{1}{2} M_i \omega_i^2 \quad (5)$$

$$E_{pei} = - \int_{\delta_i^s}^{\delta_i} f_i(\delta) d\delta \quad (6)$$

在多台系统中则是动能和势能的迭加,有:

$$E_{tot} = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n E_{kei} + \sum_{i=1}^n E_{pei} \quad (7)$$

式(4)和式(7)中第1项代表系统的动能,第2项代表系统的势能。本文的重点在于势能最大值的求取方法的研究,因此采用了经典的能量函数表达式,以求得到一般性的结论,故式(4)和式(7)没有更加详细地展示有功负荷、无功负荷以及电压幅值等系统运行参数在内的系统信息。

故障后的稳定平衡点(δ^s, ω^s)在该点处有 $E_{tot}(\delta^s, \omega^s) = 0$ 。上述能量函数对时间的导数为:

$$E_m(\text{UEP1}) = E_{pe2} - \text{UEP1} - E_{pe1} - \text{UEP1} = 0 \quad (8)$$

在实际系统中存在阻尼,即:

$$\frac{dE_{tot}}{dt} = \sum_{i=1}^n (-D\omega^2 + 0) \leq 0 \quad (9)$$

式中, D 为阻尼常数。式(9)表明式(4)在实际中满足李亚普诺夫直接法的条件,可用于分析电力系统稳定性。式(4)和式(7)的第2项都存在路径依赖问题,采用梯形法来近似计算,对结果的精确性影响不大。

2 基于二次扰动的暂态稳定性离线量化指标构建

在保证一次扰动和二次扰动将回到同一个稳定平衡点(SEP)并且二次扰动轨迹是大范围渐进稳定的前提下,二次扰动会尽可能近地通过稳定边界的不稳定平衡点(unstable equilibrium point, UEP),但依然在前述的稳定平衡点的吸引域内。基于这样的结论,一次扰动属于小扰动,采用负荷的小幅度增量增加,二次扰动则需施加加大扰动,采用三相短路故障。利用这样的两次扰动模式,可以得到如图2

所示的仿真结果。

在图2中, 稳定区域边界上的两个不稳定平衡点分别为UEP1和UEP2, 一次扰动和二次扰动轨迹分别经过或者接近这两个不稳定平衡点, 并且对应这两个不稳定平衡点时将分别出现势能极值 E_{pe1_UEP1} 、 E_{pe2_UEP1} 和 E_{pe1_UEP2} 、 E_{pe2_UEP2} 。这里的能量裕度取一次扰动和二次扰动经过或者接近同一不稳定平衡点时的势能极值差作为能量裕度, 表达式为:

$$E_m(UEP1) = E_{pe2_UEP1} - E_{pe1_UEP1} \quad (10)$$

$$E_m(UEP2) = E_{pe2_UEP2} - E_{pe1_UEP2} \quad (11)$$

式中, $E_m(UEP1)$ 和 $E_m(UEP2)$ 分别为对应不稳定平衡点UEP1和UEP2的能量裕度。由于仿真或者计算精度的影响, 式(10)和式(11)中的结果会存在一定的差距, 从保证安全性的角度考虑, 将取两者中的极小值, 最后的能量裕度为:

$$E_m = \min(E_m(UEP1), E_m(UEP2)) \quad (12)$$

式(12)衡量的是当前系统的运行点距离稳定边界的距离, 该值越大, 说明系统越稳定。当 $E_m = 0$ 时, 系统已经濒临失稳的临界状态。在系统暂态过程中, 系统的稳定性发展趋势与故障时注入系统的动能有关, 注入系统的动能太多, 导致系统当前的网架结构不能完全吸纳, 则系统容易失稳。

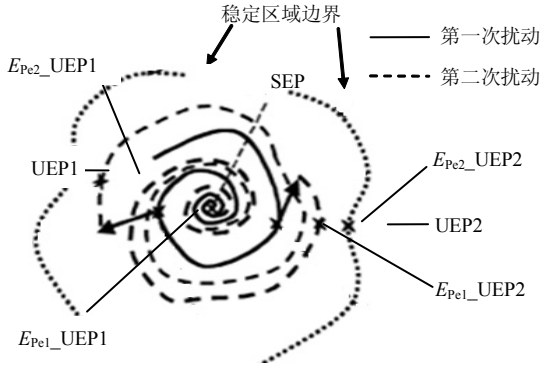


图2 基于二次扰动的能量裕度计算

3 二次扰动法的具体实现

3.1 二次扰动法的基本原理

根据现有的文献, 求一个系统完整的稳定边界是不必要的, 要求系统的稳定裕度, 只需要求得某状态下运动轨迹对应的CUEP(controlling unstable equilibrium point), 再根据CUEP求得对应的势能极限 E_{pe_UEP} , 以此判别该运动轨迹是否穿越稳定边界。

由于CUEP的求取需要较长的计算时间, 在求取 E_{pe_UEP} 时, 将结合二次扰动法, 以避免求取CUEP,

节约计算时间。二次扰动法^[18]的具体实现过程如图3所示。图中, 时段 $0 \sim t_start$ 是一次扰动持续时段, 在 t_start 时刻, 对应系统动能最小点 $E_{ke(t_start)}$, 在 t_start+ 时刻, 对系统第二次施加一个足够大的扰动, 令系统不稳定, 系统的动能增加, 动能轨迹经过第二次动能最大时刻为 t_clear , 此时为故障极限切除时间, 对应的动能为 $E_{ke(t_clear)}$; 系统完全恢复稳定, 对应时刻为 t_{s2} , 对应的动能为 $E_{ke(t_{s2})}$, 势能为 $E_{pe(t_{s2})}$ 。

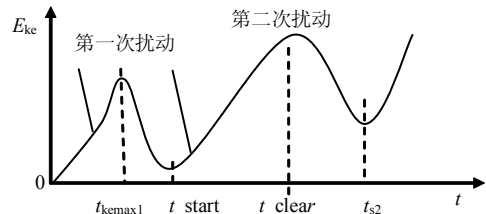


图3 动能轨迹曲线

势能极限 E_{pe_UEP} 对应位于势能边界上的不稳定平衡点对应的势能值, 即动能全部转化后的势能最大值。传统的CUEP法, 计算量很大, 为了减少计算量, 在计算 E_{pe_UEP} 时采用插值法获取最终结果。

3.2 基于插值法的最大势能值计算

稳定边界上的势能极限值实际是对应UEP的最大势能值, 因此, 在该点处势能随时间的变化率为0。如果能得到该点附近任意两点的势能变化率及对应的时间, 则根据插值法, 可以计算得到对应该点的时间, 再根据该点的时间反推回去计算得到该点的势能值, 即为要求取的最大势能值。

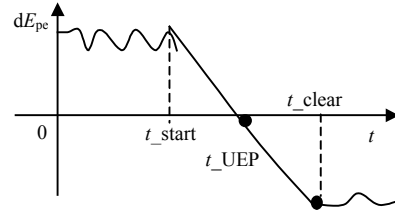


图4 插值法求势能极限值

在图4中, 横坐标代表暂态过程, 纵坐标代表势能在暂态过程中的变化量。在式(6)中, 由于 δ 是时间的函数, 因此, 在时间 t_start 和 t_clear 时刻的势能变化量 $dE_{pe(t_start)}$ 和 $dE_{pe(t_clear)}$, 可以根据时间 t_start 和 t_clear 临界时刻前后的势能计算得到。而在 t_UEP 时刻对应势能边界, 为势能极值, 其变化量为0, 利用插值法, 可得:

$$t_UEP = t_start - \frac{dE_{pe(t_start)} (t_start - t_clear)}{(dE_{pe(t_start)} - dE_{pe(t_clear)})} \quad (13)$$

该思路的依据是PEBS对应势能最大值, 且势能在PEBS穿越点的变化率为0。在式(13)中, t_start 为

第一次扰动发生的时刻, t_{clear} 为二次扰动发生后动能最大时刻, 可根据动能仿真曲线得到。 $dE_{\text{pe}}(t_{\text{start}})$ 和 $dE_{\text{pe}}(t_{\text{clear}})$ 已知, 因此, 可以计算得到 t_{UEP} , 然后根据式(11)得到对应该时刻的 $E_{\text{pe}}(t_{\text{UEP}})$ 为:

$$E_{\text{pe}}(t_{\text{UEP}}) = \sum_{i=1}^n \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{UEP}}} \frac{\partial E_{\text{pe}i}}{\partial t} dt \quad (14)$$

式(14)的计算一方面避免了计算 t_{s2} 时刻的动能和势能, 另一方面也避免了直接求解CUEP或者势能边界逸出点, 一定程度上减少了计算量。缺点是需保存 t_{start} 时刻的运行状态, 并离线实施二次扰动, 这在一定程度上增加了计算时间。

4 实例验证

4.1 三机系统仿真分析

三机系统的接线如图5所示。

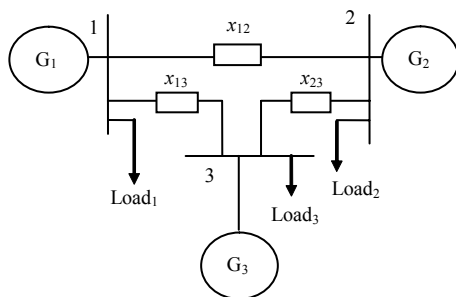


图5 三机系统接线图

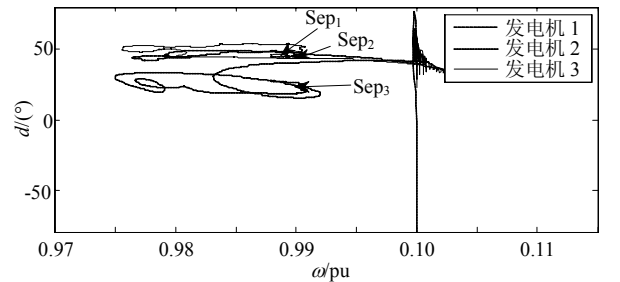
图5中 G_1 、 G_2 和 G_3 为发电机, G_3 为参考发电机, 具有较大的惯性, 带有快速响应控制器, G_1 和 G_2 都带有快速励磁控制系统。在每台发电机母线处都存在负荷, $\text{Load}_1=12.06+j2.14$ MVA, $\text{Load}_2=8.23+j4.26$ MVA, $\text{Load}_3=5.20+j5.10$ MVA。 x_{12} 、 x_{23} 和 x_{13} 为线路电抗, 且 $x_{12}=x_{23}=x_{13}=0.30$ 。

1) 系统轨迹变化分析。

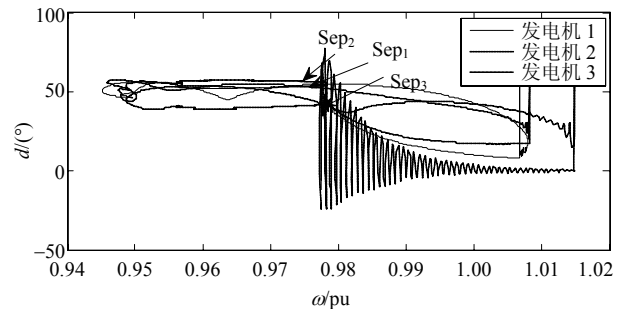
一次扰动为三相短路故障, 发生在支路1-2的中点, 系统稳定后的第50 s时刻, 持续0.5 s清除; 二次扰动发生在70 s时刻, 持续0.5 s清除。图6为从启动到稳定的过程(0~40 s)中的系统轨迹变化曲线。图6a中的 Sep_1 、 Sep_2 和 Sep_3 分别是发电机1、2和3的初始稳定平衡点, 分别对应坐标 $(0.99, 54.37^\circ)$ 、 $(0.99, 55.78^\circ)$ 和 $(0.99, 42.13^\circ)$ 。从图6a可以看出, 3台发电机在启动以后都以很快的速度到达了稳定平衡点。

图6b表示一次扰动发生在50 s时刻, 从故障发生到系统达到稳定平衡点(50~60 s)的轨迹。图6b中的 Sep_1 、 Sep_2 和 Sep_3 分别是发电机1、2和3经历一次扰动后的稳定平衡点, 分别对应坐标 $(0.978, 54.67^\circ)$ 、

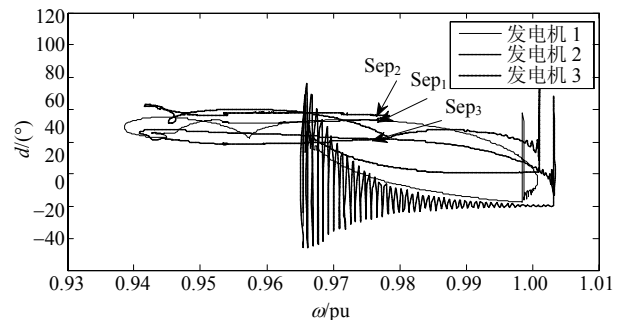
$(0.978, 55.90^\circ)$ 和 $(0.978, 42.15^\circ)$ 。与图6a中的稳定平衡点相比, 无论是平衡点的角速度还是转子角, 都有极小的移动, 说明三相短路故障对该系统的整体暂态稳定性有较大影响, 导致发电机不能回到初始稳定点。



a. 三机系统的稳定轨迹及初始稳定平衡点



b. 三机系统一次扰动后的运动轨迹及稳定平衡点



c. 三机系统在二次扰动后的运动轨迹及稳定平衡点

图6 系统轨迹变化曲线

图6c表示二次扰动(三相短路故障, 发生在支路1-2的中点)发生在70 s时刻, 从扰动发生到扰动清除并最终稳定的过程(70~150 s)中的轨迹变化曲线。图中 SEP_1 、 SEP_2 和 SEP_3 分别是发电机1、2和3经历二次扰动后的稳定平衡点, 分别对应坐标 $(0.978, 54.66^\circ)$ 、 $(0.978, 55.88^\circ)$ 和 $(0.978, 42.14^\circ)$ 。相比较于图6b, 3台发电机的平衡点位置几乎没有移动, 仅从平衡点的变化来看, 第二次三相短路故障没有对系统的稳定性造成太大的影响。

2) 在故障过程中的动能和势能变化的计算。

根据两次扰动后的运动轨迹和推导的动能和势能计算模型, 可以得到两次扰动过程中系统的动能和势能变化曲线如图7和图8所示。

在系统中, 系统任何时刻动能和势能是守恒的, 从图7和图8所示的动能和势能变化曲线也验证了这一动能和势能的守恒性。另外, 对于系统而言, 两次扰动相当于对系统注入了两次动能, 这两次注入的动能忽略系统其他动能消耗的情况下最终将转化为不同形式的势能存在于系统中。因此, 在图8中, 第一次扰动注入的动能全部转化为势能后, 在达到稳定状态后不再变化, 在第二次扰动再次注入动能后, 势能阶梯型爬升, 势能随着时间的变化呈现迭加的态势, 一旦动能全部转化为势能以后, 系统的势能将维持不变。

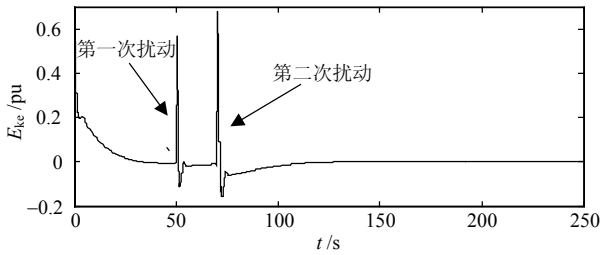


图7 三机系统从启动到经历两次扰动的动能变化曲线

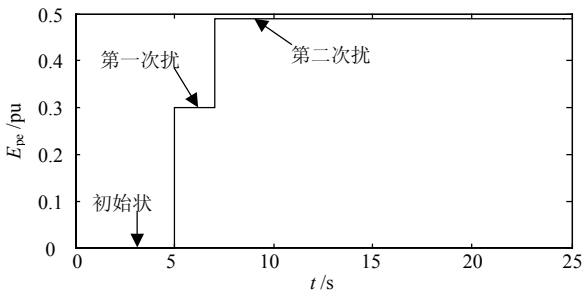


图8 三机系统对应不同扰动的势能变化

3) 能量裕度计算结果。

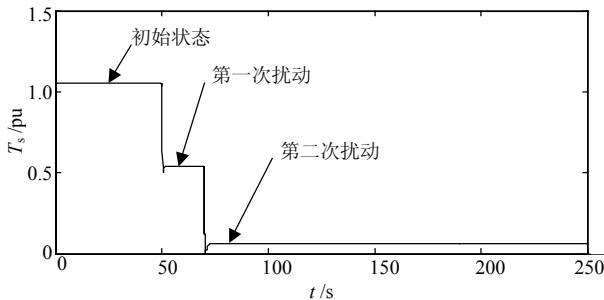


图9 三机系统从启动到经历两次扰动的能量裕度变化曲线

图9展示了系统在初态以及经受了两次扰动后的能量裕度的变化情况。系统初始状态时的能量裕度在1附近, 而经历了一次扰动以后, 能量裕度下降到0.5左右, 在经历了二次扰动后, 则下降到0.1左右, 此时系统的能量裕度非常小, 系统已经开始脆弱化, 如果再有一次扰动, 系统将濒临失稳。值得提出的是, 在系统轨迹变化分析中考察稳定平衡点时, 第一次扰动和第二次扰动后的稳定平衡点几乎保持一

致, 相比较根据能量裕度的计算得出的暂态稳定性判断结果, 说明单纯通过判断稳定运行点是否移动来给出系统稳定性是否改变的思想可能导致错误的暂态稳定性判断。

4.2 IEEE-30母线系统的仿真分析

IEEE-30母线系统共有6台发电机, 30条母线, 41条支路, 4台有载调压变压器, 系统的接线如图10所示。

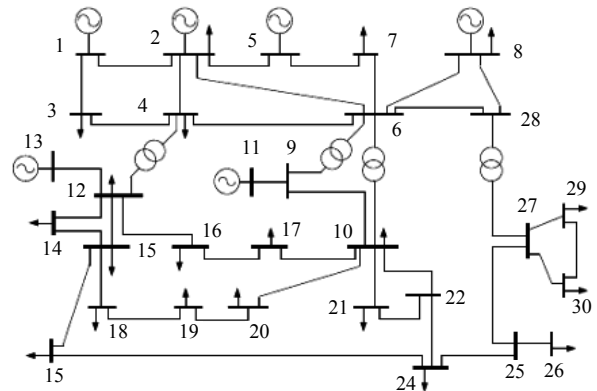


图10 IEEE-30母线系统

对该系统进行仿真完成本文方法及CUEP法计算结果比较。在运用CUEP法时, 对故障中轨迹进行了积分, 找到其与稳定域边界的正交点, 即CUEP, 然后将对应的CUEP(即 δ)值代入式(7), 计算得到了对应点的势能极大值。最后将该值代入式(11), 获取了IEEE-30母线系统中三相短路故障发生在不同点时的能量裕度值。两种方法的仿真计算时间和计算结果的比较分别如表1和表2所示。

表1 CUEP法和本文方法的计算时间与能量裕度结果比较

	CUEP法	本文方法
仿真时间/s	9.33	4.05
能量裕度计算/s	0.63	0.62
总的计算时间/s	9.96	4.67

表2 IEEE-30母线系统中基于插值法的PEBS法与CUEP法计算结果的比较

不同故障点	本文方法	CUEP法	误差/%	本文方法	CUEP法	误差/%
	一次扰动	一次扰动		二次扰动	二次扰动	
1-2	0.423	0.435	2.76	0.247	0.254	2.76
2-5	0.417	0.421	0.95	0.274	0.282	2.84
5-7	0.578	0.592	2.36	0.354	0.375	5.60
12-16	0.701	0.719	2.50	0.435	0.457	4.81
9-21	0.759	0.780	2.69	0.466	0.497	6.24
18-19	0.898	0.912	1.54	0.552	0.573	3.66
15-23	0.869	0.893	2.69	0.523	0.541	3.33
29-30	0.953	0.977	2.46	0.899	0.921	2.39

从表1可见, CUEP法的仿真时间明显长于本文方法, 其原因在于故障轨迹积分以求取可控不稳定平衡点(CUEP)时需要耗较长时间, 而本文方法不需

要对故障轨迹进行积分,其耗时主要在实施二次扰动过程。在能量裕度计算上,CUEP法与本文方法消耗时间基本相当,这是因为能量裕度计算过程基本相同,计算量相当。从仿真到裕度计算,CUEP法比本文方法耗费时间多5.29 s。从而证明了本文方法在计算速度上有了提高,距离暂态能量函数的在线应用又近了一步。

对表2中一次扰动和二次扰动的计算结果纵向对比可知,当三相短路故障发生在距离发电机越近或者直接与发电机相连的支路时,稳定裕度越低,如支路1-2、2-5和5-7,相比较于支路12-16、9-21、18-19和15-23,在经受了一次扰动和二次扰动后,其稳定裕度下降很多,说明这些支路对维持系统的稳定性具有重要意义。支路29-30在经受一次扰动和二次扰动后,稳定裕度最大,该支路对系统稳定性影响最小。表2进行横向比较,无论是一次扰动还是二次扰动,CUEP法得出的能量裕度值明显大于本文方法的计算结果。原因在于获取CUEP的过程中,多次积分及步长选取都会导致较大的误差。而本文方法在二次扰动的过程中,第二次故障恢复后的稳定平衡点及CUEP的确定,也会因为大量的计算导致误差增大。另外,故障地点的选取,对计算结果的精确性也有一定的影响,如表2中所示,不同的故障地点对应的计算结果误差不同,支路9-21断开时,误差为6.24%,达到最大。

5 结束语

本文结合暂态能量函数模型,分析了基于二次扰动法的势能边界值插值算法,推导了系统暂态稳定性量化指标,通过在三机系统和IEEE-30母线系统中的仿真结果及其与CUEP法的对比分析表明:基于二次扰动法的势能边界值插值算法,能够避免直接求取稳定域边界上的不稳定平衡点,缺点在于需要保存第一次故障后系统稳定时的状态参数并依赖第二次扰动的发生;基于二次扰动法计算的势能边界值,直接受到第二次扰动的持续时间的影响,即不同的持续时间得到的势能边界值有差异,一定程度上影响结果的精确性;基于二次扰动法的暂态稳定性量化指标,相比较于CUEP法,计算过程简单,易于理解,计算速度有所提高,能适应不同的系统运行条件,其局限是只能用于暂态稳定性离线分析,下一步的工作是进一步研究基于能量裕度的电力系统暂态稳定性在线评估指标构建。

参 考 文 献

- [1] DONG Z Y, ZHAO J H, HILL D J. Numerical simulation for stochastic transient stability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1741-1749.
- [2] JAIME C C, JOSÉ L R, DELIA G C, et al. Real-time transient stability assessment based on centre-of-inertia estimation from phasor measurement unit records[J]. IET Gener Transm Distrib, 2014, 8(8): 1363-1376.
- [3] 汪隆君, 王钢. 基于动态安全域与埃奇沃斯级数的电力系统暂态稳定概率评估[J]. 中国电机工程报, 2011, 31(1): 52-58.
WANG Long-jun, WANG Gang. Probabilistic assessment of transient stability based on dynamic security region and edge worth series[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 52-58.
- [4] GUOT Y, MILANOVIC J V. Probabilistic framework for assessing the accuracy of data mining tool for online prediction of transient stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 377-385.
- [5] FRANCISCO R G, ATHULA D R, UDAYA D A, et al. Support vector machine-based algorithm for post-fault transient stability status prediction using synchronized measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1474-1482.
- [6] 叶圣永, 王晓茹, 刘志刚, 等. 基于支持向量机增量学习的电力系统暂态稳定评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 15-19.
YE Sheng-yong, WANG Xiao-ru, LIU Zhi-gang, et al. Power system transient stability assessment based on support vector machine incremental learning method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 15-19.
- [7] LÜ J Q, MIROSLAW P, UDAYA D A. Prediction of the transient stability boundary using the Lasso[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 281-288.
- [8] YIN Ming-hui, CHUNG C Y, WONG K P, et al. An improved iterative method for assessment of multi-swing transient stability limit[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2023-2030.
- [9] 朱林, 徐敏, 陈裔生, 等. 一种改善电力系统暂态性能的轨迹跟踪控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 1-5, 22.
ZHU Lin, XU Min, CHEN Yi-sheng, et al. A method for improving power system transient performance using estimator resetting based on tracking models[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 1-5, 22.
- [10] YAN J, TANG Y F, HE H B, et al. Cascading failure analysis with DC power flow model and transient stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 285-295.
- [11] 汪小明, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于能量函数法的电网暂态稳定性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 114-118.
WANG Xiao-ming, LIU Di-chen, WU Jun, et al. Energy function-based power system transient stability analysis[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 114-118.
- [12] 董超, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于能量函数的电网低频振荡及扰动源定位研究[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 175-181.

- DONG Chao, LIU Di-chen, LIAO Qing-fen, et al. Research on low frequency oscillation in power grid and location of disturbance source based on energy function[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 175-181.
- [13] 王科, 游大海, 尹项根, 等. 基于支路势能脊的电力系统暂态稳定分析和临界割集识别[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 262-269.
- WANG Ke, YOU Da-hai, YIN Xiang-gen, et al. Power system transient stability analysis and critical cutset detection based on branch ridge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 262-269.
- [14] ANGHEL M, FEDERICO M, ANTONIS P. Algorithmic construction of Lyapunov functions for power system stability analysis[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2013, 60(9): 2533-2546.
- [15] WU Y H, MUSAVI M, LERLEY P. Synchrophasor-based monitoring of critical generator buses for transient stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(99): 1-9.
- [16] 汪芳宗, 何一帆. 基于辛龙格-库塔-奈斯通方法的电力系统暂态稳定性并行计算方法[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 40-45.
- WANG Fang-zong, HE Yi-fan. A parallel computational method for power system transient stability based on Symplectic Runge-Kutta-Nyström method[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 40-45.
- [17] VAHID J M, ZHOU Z Y, VENKATA D V. Large-scale transient stability simulation of electrical power systems on parallel GPUs[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(7): 1255-1266.
- [18] ROGER T T, VITTAL V, KLIEMANN W. An improved technique to determine the controlling unstable equilibrium point in a power system[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 1996, 43(4): 313-322.

编辑 漆蓉