

混合法暂态稳定实用计算的几点改进

王宗义¹, 余志文², 郭志忠³

(1. 中国南方电网公司市场交易部, 广东 广州 510623; 2. 中国南方电网公司广东省电力调度中心, 广东 广州 510600;
3. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对混合法暂态稳定分析在能量函数计算、稳定情况判别以及稳定指标计算等方面存在的问题, 从实用化的角度, 提出了几点改进。采用由功角、转速、加速功率以及动能和势能定义的综合判据来判断系统稳定情况, 可以避免故障后稳定平衡点的求取和失稳模式的识别。对于系统稳定情形, 利用系统运动轨迹回摆处的功角值定义的指标, 来表征系统的稳定程度, 进一步可以比较不同控制措施对稳定的作用, 其优势在于计算方便。华北和东北互联电网及 New England 系统的算例分析验证了所提出判据及稳定指标的有效性。

关键词: 暂态稳定; 混合法; 势能参考点; 稳定判据; 稳定裕度

Some improvements on application of hybrid method for transient stability analysis

WANG Zong-yi¹, YU Zhi-wen², GUO Zhi-zhong³

(1. Power Trading Dept, China Southern Power Grid Corporation, Guangzhou 510623, China;

2. Guangdong Power Dispatch Center, China Southern Power Grid, Guangzhou 510600, China;

3. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Some improvements on transient energy function calculation, stability criterion and stability index for the practice of hybrid method of transient stability analysis are proposed. Integrated criterion based on rotor angle, angular velocity, acceleration power, kinetic energy and potential energy is put forward for estimating the system stability, which is independent of the calculation of post-fault stable equilibrium point and mode of disturbance. For the stable case, using the value of angles at the system swing back point, stability index is defined for denoting the degree of stability and comparing the effects of various stability control actions. Case studies on North China and Northeast China interconnected grid and New England test system show the effectiveness and efficiency of this method.

Key words: transient stability; hybrid method; potential energy reference point; stability criterion; stability margin

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)11-0037-05

0 引言

暂态稳定分析的混合法将时域仿真法与暂态能量函数法相结合, 既保留了时域仿真法模型适应性强特点, 又能给出稳定裕度指标, 因此从上世纪90年代被提出^[1], 一直得到了快速的发展和广泛的应用^[2-8]。混合法的关键技术包括两方面, 一是准确且及早地判断系统的稳定情况, 以便及时终止时域仿真以节省计算量; 二是能够方便地计算稳定裕度指标。

目前混合法存在的主要问题是需要借助于故障后稳定平衡点 (SEP) 来作为势能计算的参考点和

用于计算稳定判据。SEP 对于稳定控制的多重操作, 尤其是多重切机、切负荷以及借助 FACTS 装置改变网络参数的情形时, 求解比较困难。另外, 失稳模式的判别多采用启发性方法, 如选取故障后某一时刻的功角、转速或加速度作为特征值来划分临界机群和非临界机群, 此种方法在功角振荡时可靠性很难保证。在系统稳定情形下求取稳定裕度指标时, 混合法多采用“Second Kick Method”^[2-4], 早期方法求得的结果被证实偏于悲观^[2], 而后来的改进方法^[4]则显得较为繁琐。

本文从稳定判据和稳定裕度指标两个方面, 对混合法实用计算进行了几点改进。提出了势能参考

点的选取原则、系统稳定判据以及表征系统稳定程度的指标, 据此可以较为方便地判断系统在故障切除及控制操作结束后是否稳定, 以及用于快速比较不同控制措施对系统稳定的影响程度。

1 时域仿真终止判据

1.1 势能参考点的选取原则

本文将电网故障以及各种控制操作统称为电网的扰动。系统在故障持续期间, 往往表现为暂态动能和暂态势能逐渐增大。扰动结束后, 动能逐渐向势能转化。系统是否稳定, 取决于系统在扰动结束前积累的暂态动能, 在扰动结束后能否全部转化为暂态势能。系统的稳定裕度大小取决于在动能极小值点系统还可以吸收的暂态动能大小(对应稳定情形)和未被吸收的剩余的暂态动能大小(对应不稳定情形)。系统的稳定情况, 完全可以通过考察扰动结束后的运动轨迹来判断。因此, 选取所有扰动结束后的系统运行点作为势能参考点和能量函数法分析的起点, 不会影响系统是否稳定的判别和稳定裕度的计算, 而且可以避免势能计算对应网络与当前仿真对应网络不一致的情形, 能够带来计算上的方便。

对于 n 机系统, 在惯性中心坐标下, 暂态势能可以表示为

$$V_{pe} = -\sum_{i=1}^n \int_{\theta_i^0}^{\theta_i} f_i^p(\theta) d\theta_i \quad (1)$$

其中: $f_i^p(\theta)$ 为第 i 台发电机转子加速功率, 上标 p 表示对应所有扰动都结束后的网架结构。 θ_i^0 为势能计算的参考点, 本文采用扰动结束后的系统实际运行点。本文采用数值方法, 沿系统实际运动轨线计算暂态势能, 即

$$V_{pe} = -\frac{1}{2} \sum_{l=1}^k \sum_{i=1}^n [(f_i^p(\theta(t_l)) + f_i^p(\theta(t_{l+1}))) (\theta_i(t_{l+1}) - \theta_i(t_l))] \quad (2)$$

其中: k 为计算轨线上的积分步数。

1.2 稳定判据

良好的时域仿真终止判据能够在可靠判定系统是否稳定的前提下及早终止仿真计算, 以节省计算量, 同时为稳定裕度指标计算提供支持。

时域仿真法以发电机相对功角作为稳定的判据, 在设定的仿真时间内若出现最大相对功角达到某一设定值, 则判定系统失稳, 反之则系统稳定。这种判据缺点是, 为了消除误判, 有时需要一个很大的设定值(如, 500°), 造成仿真时间延长。文献

[1,2,4]采用惯性中心坐标下发电机转子加速度、转速以及功角向量的点乘(内积)作为系统轨迹到达势能界面或系统功角开始回摆的标志, 以此判断系统的稳定性。此类方法需要借助于故障后 SEP, 并且在复杂系统模型以及多重网络操作下其可靠性也难以保证^[6]。

本文提出一种判定系统稳定性的方法, 可以避免 SEP 的计算, 而且物理意义非常明显。按照直接法理论, 系统失稳意味着系统运行轨线突破了 PEBS, 之后动能和功角将持续增大。系统沿故障后轨迹到达势能主峰值的必要条件为 $dV_{pe}/dt = 0$, 由式(1)求得

$$\frac{dV_{pe}}{dt} = -\sum_{i=1}^n f_i^p(\theta) \cdot \tilde{\omega}_i = 0 \quad (3)$$

因此, 定义指标

$$dp1 = \sum_{i=1}^n f_i^p(\theta) \cdot \tilde{\omega}_i \quad (4)$$

$dp1$ 由负值到正值过零点作为系统势能到达极大值的标志。

系统保持功角稳定, 在惯性中心坐标下, 意味着系统功角摆动到一极大值后开始回摆。定义系统功角摆动大小的指标为

$$N(\theta) = \|\theta - \theta^{cl}\|_2 \quad (5)$$

其中: θ^{cl} 为最后一次扰动结束时刻的功角值。 $N(\theta)$ 位于极值点的特征是 $dN(\theta)/dt = 0$ 。经推导

(见附录), 得 $\sum_{i=1}^n \tilde{\omega}_i \cdot (\theta_i - \theta_i^{cl}) = 0$, 因此, 定义指标

$$dp2 = \sum_{i=1}^n \tilde{\omega}_i \cdot (\theta_i - \theta_i^{cl}) \quad (6)$$

$dp2$ 由正值到负值过零作为系统功角由极大值开始回摆的标志。

为了简化起见, 不作特殊说明, 本文以下 $dp1$ 过零均指由负值到正值过零, $dp2$ 过零均指由正值到负值过零。

$dp1$ 过零点, 只是表明势能到达一个极大值, 并不能断定为全局极大值。系统轨迹穿越 PEBS 后失稳的特征是, 动能持续增大, 势能持续减小, 因此可以将动能与势能之差的绝对值作为判据系统失稳的辅助判据。定义暂态能量指标

$$EI(t) = |V_{ke}(t) - V_{pe}(t)| \quad (7)$$

该指标主要用于反映暂态能量的变化趋势, 对

计算结果精度要求不高。动能 V_{ke} 的计算采用各发电机暂态动能累加的形式,不采用两机模型修正,可以避免失稳模式识别以加快计算速度。通过大量算例验证,该简化方法不会影响对稳定性质的判断。势能 V_{pe} 则按式(2)的数值方法进行计算。

判断系统稳定性时,首先记录所有扰动都结束时刻(即势能参考点处)的 EI 值,记做 EI_0 。向前仿真系统运动轨迹,当 $dp1$ 过零点时计算 EI 值,与 EI_0 比较,取二者的较大值作为新的 EI_0 值。继续向前仿真,若系统失稳,则 EI 值会一直增大下去,并且不再减小。因此可定义条件

$$EI(t) = k \cdot EI_0 \quad (8)$$

若式(8)条件满足,则可判定系统失稳。其中,定义 k 值是为了消除动能和势能相互振荡对稳定判断的影响, k 值越大,效果越好,但所需的仿真时间会越长。经大量算例验证, k 值取3~5可以满足需要,本文 k 值取3。

对于扰动结束前系统已经失稳的情形(一般很少出现),在扰动结束后通常没有 $dp1$ 或 $dp2$ 过零点出现,其特征是动能持续上升,功角逐渐增大。判别方法为,设定最长分析时间 t_{max} ,在达到 t_{max} 时分析最大功角值(如,大于 500°),则可判定系统失稳。

1.3 稳定分析步骤

判断系统稳定性的流程图见图1,具体分析步骤如下:

1) 启动时域仿真软件,从扰动发生时刻开始,仿真到系统最后一次扰动结束时刻,并计算此时刻的 EI 值,记做 EI_0 。此后利用时域仿真软件每一计算步长输出的功角、转速、加速功率,转化到惯性中心坐标后,计算 $dp1$ 、 $dp2$ 、 V_{ke} 、 V_{pe} 的值。

2) 若首先出现 $dp1$ 过零,计算该点的 EI 值,与 EI_0 比较,取二者的较大值作为新的 EI_0 值。继续向前仿真并计算 EI 值。在达到 $EI(t) = k \cdot EI_0$ 之前,若有新的 $dp1$ 过零出现,则更新 EI_0 的值(更新方法为取二者的较大值),继续向前仿真并检测条件 $EI(t) = k \cdot EI_0$ 是否满足。在 $EI(t) = k \cdot EI_0$ 条件满足前,若有 $dp2$ 过零出现,则系统首摆稳定,可根据要求停止时域仿真或继续分析。若 $EI(t) = k \cdot EI_0$ 满足,则判断系统失稳,停止仿真。

3) 若 $dp2$ 过零出现,则可断定系统首摆稳定,可根据要求停止时域仿真或继续分析。

4) 若达到最大分析时间 t_{max} ,尚未能够用上判据判断出系统的稳定情况,则采用常规的时域仿真判据来判断系统稳定情况,并停止计算。

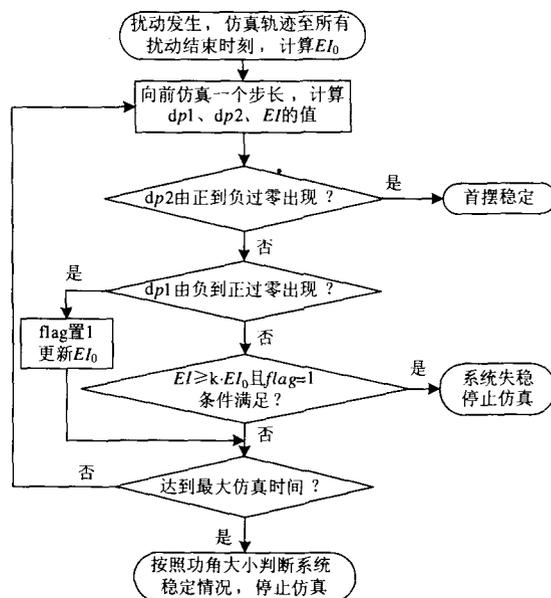


图1 时域仿真终止判断流程图

Fig. 1 Flow chart of application of time-domain simulation termination criterion

2 系统稳定性指标

系统的稳定程度,可以用稳定裕度指标来表征。混合法一般采用暂态能量裕度(TEM)作为裕度指标。系统失稳时,取修正的暂态动能的最小值的相反数作为能量裕度,不需要额外的计算。当系统稳定时,能量裕度无法直接求得,准确求取临界势能,是解决问题的关键。

常用的“Second Kick Method”,在故障切除后的第一个动能极小值点处,重新引入持续故障,沿持续故障轨迹寻找临界势能点,该方法的缺点是计算较为复杂。文献[9,10]在系统稳定时将系统运动轨迹上动能与势能之差的最大值作为衡量系统稳定程度或故障严重程度的指标,严格地讲此种指标只能反映系统稳定程度的相对大小,其优点是可以避免额外的计算。

提高系统稳定性包括两个方面:一是增大系统的临界势能,即扩大系统的稳定域,稳定域一般认为取决于系统扰动结束后的最终结构;二是减弱系统轨迹向稳定边界移动的趋势,具体表现为减小发电机功角摆动的相互分离程度,让各功角变化轨迹尽可能相互靠近。

根据以上思想,提出表征系统稳定性的指标,

这些指标同时也是为了比较各种控制措施对系统稳定的贡献大小。若系统稳定，则利用指标 $N(\theta) = \|\theta - \theta^{cl}\|_2$ ，来表征系统回摆即 dp2 过零时功角相互分离的程度。 $N(\delta)$ 越小，表明系统的稳定性越好，相同初始条件下控制措施对系统稳定的效果也越好。若系统失稳，则采用传统的方法，利用已求得的临界势能点处的功角信息来判定失稳模式，对暂态动能进行两机等值模型修正，动能 V_{ke-min} 指标表征系统故障期间积累动能超出系统最大转化能力的部分。 V_{ke-min} 越小，表明相同初始条件下控制措施对系统稳定的效果相对越好，为保持系统稳定需要再付出的控制代价也越小。

3 算例分析

3.1 仿真终止判据的验证

本文对我国东北和华北联网后的 274 机、2378 节点实际系统进行分析。由时域仿真法计算可得，牡二厂 220 kV 母线发生三相短路故障，0.14 s 切除故障，系统稳定；0.15 s 切除故障，则系统失稳。

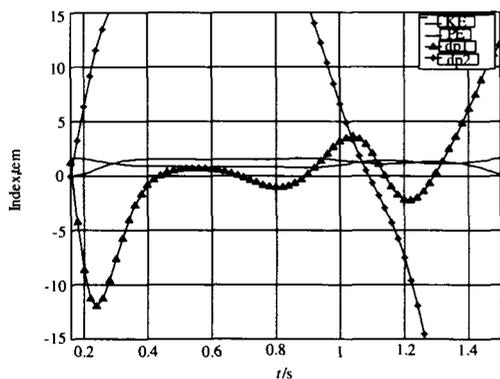


图 2 系统稳定情形 (故障切除时间 0.14 s)

Fig. 2 Stable case (fault clearing time is 0.14 s)

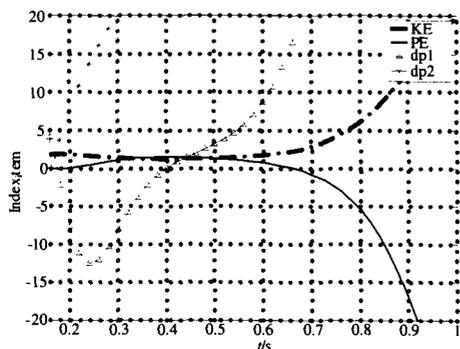


图 3 系统失稳情形 (故障切除时间 0.15 s)

Fig.3 Unstable case (fault clearing time is 0.15 s)

图 2 所示为系统稳定情形，扰动结束后计算

EI_0 的值。向前仿真，dp1 首先过零，检查是否更新 EI_0 值，dp1 过零标志 flag 置 1。继续向前仿真，EI 指标条件式 (8) 不满足，最终 dp2 过零出现，系统首摆稳定。从仿真时间来看，在 1.08~1.10 s 区间 dp2 过零，判定首摆稳定，而一般的时域仿真需要计算到 5 s 以上才能判定系统稳定。

图 3 所示为系统失稳情形，0.15 s 切除故障，dp1 首先过零，且 EI 指标单调递增，式 (8) 条件满足，dp2 过零未出现，系统失稳。EI 指标满足条件发生在 0.76 s，最大功角值大于 500° 出现的时刻为 0.92 s。

3.2 系统稳定性指标验证

文献[11, 12]提出了暂态稳定分级控制方法，按电气距离指标确定负荷切除的次序。负荷对应的电气距离越小，切除后对系统稳定越有利。本文利用定义的指标对上述结论进行验证。

算例采用 New England 10 机系统，原始数据做如下修改：线路 19-20 去掉变压器；增加 20-29 线路，阻抗为 0.0045+j0.055，充电电容容纳 0.6987。扰动序列为：线路 20-29 母线 20 侧在 0 s 发生三相短路，0.20 s 切线路 20-29，0.22 s 分别在 33 母线切机 20%，在 34 母线切机 60%，分析 0.24 s 切除各母线负荷对稳定贡献的大小。

为了便于比较，各母线负荷切除量均为 90 MW，切除后系统均保持稳定。记录 dp2 过零点的 $N(\theta)$ 值，并与各母线对应的电气距离相比较，见表 1。可以看出，基本上是电气距离越大， $N(\theta)$ 指标也越大，表明稳定控制效果越差，与文献[12]的结论相符，验证了本文所提指标的有效性。

表 1 切负荷措施对稳定的影响指标

Tab. 1 Effects of load shedding on stability

母线编号	电气距离	$N(\theta)$ 指标
21	0.084551	2.9402
23	0.084887	2.9203
15	0.086565	2.9613
3	0.092901	2.9671
4	0.093424	2.9888
26	0.093893	2.9946

4 结论

从稳定判据和稳定裕度两个方面，对混合法暂态稳定实用计算提出了几点改进，主要表现在：

(1) 选取所有扰动结束后的系统实际运行点为势能参考点，采用数值方法计算暂态势能，可以避

免故障后 SEP 的求解和实际仿真网络与势能计算对应网络不一致的情形, 节省了计算量。

(2) 采用由功角、转速、加速功率以及动能和势能定义的综合判据来判断系统稳定情况, 判据简洁, 物理意义明显, 可以避免失稳模式的识别。

(3) 系统稳定时以系统回摆时对应的指标 $N(\theta) = \|\theta - \theta^{cl}\|_2$ 来表征稳定程度, 该指标除正常的仿真外, 无需额外的计算, 便于快速比较各控制措施对系统稳定的贡献大小。

附录: 功角向量 2 范数对时间导数的推导

由于 $N(\theta) = \|\theta - \theta^{cl}\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_i^{cl})^2}$, 所以

$$\frac{dN(\theta)}{dt} = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_i^{cl})^2}} \sum_{i=1}^n [2(\theta_i - \theta_i^{cl}) \frac{d\theta_i}{dt}]$$

而 $\frac{d\theta_i}{dt} = \tilde{\omega}_i$, 由 $\frac{dN(\theta)}{dt} = 0$, 得

$$\sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_i^{cl}) \tilde{\omega}_i = 0$$

参考文献

- [1] Maria G A, Tang C, Kim J. Hybrid Transient Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 384-393.
- [2] Tang C K, Graham C E, EIL-kady M, et al. Transient Stability Index from Conventional Time Domain Simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1524-1530.
- [3] Mansour Y, Vaahedi E, Chang A, et al. B.C. Hydro's On-line Transient Stability Assessment (TSA) Model Development, Analysis, and Post-processing[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 241-253.
- [4] Vaaedi E, Mansour Y, Chang A Y, et al. Enhanced "Second Kick" Methods for On-Line Dynamic Security Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1976-1982.
- [5] Vaahedi E, Mansour Y, Tse E K. A General Purpose Method for On-line Dynamic Security Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 13(1): 243-249.
- [6] Chan K W, Dunn R W, Daniels A R. On-line Stability Constraint for Large Complex Power Systems[A]. In: Proceedings of the 4th International Conferences on Advances in Power System Control, Operation and Management[C]. Hongkong:1997: 170-175.
- [7] FANG D Z, Chung T S, David A K. Improved Techniques for Hybird Method in Fast Transient Stability Assessment[J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1997, 144(2): 107-112.
- [8] Fang D Z, Chung T S, David A K. Improved Hybrid Approach to Transient Stability Assessment[J]. IEE Proceedings on Gener, Transm, and Distrib, 2005, 152(2): 201-207.
- [9] Ejebe G C, Jing C, Waight J G, et al. Security Monitor for On-line Dynamic Security Assessment[A]. In: Fourth International Conference on Power System Control and Management (Conf. Publ. No. 421)[C]. 1996. 58 - 64.
- [10] Fu C, Bose A. Contingency Ranking Based on Severity Indices in Dynamic Security Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 980-986.
- [11] 余志文, 白雪峰, 郭志忠, 等. 大容量远距离输电网暂态稳定控制方法探讨[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 57-60.
YU Zhi-wen, BAI Xue-feng, GUO Zhi-zhong, et al. Probe on the Transient Stability Control Method for Heavily Stressed Transmission Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 57-60.
- [12] 余志文. 大容量远距离输电网暂态稳定分级控制方法(博士学位论文)[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003. 44-58.
YU Zhi-wen. Multi-level Transient Stability Control Method for Heavily Stressed Long-distance Transmission Network, Doctoral Dissertation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003.44-58.

收稿日期: 2007-09-22; 修回日期: 2007-12-27

作者简介:

王宗义 (1971-), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力交易及电力市场研究工作; E-mail: zywang0531@hotmail.com

余志文 (1974-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电网调度及运行方式工作;

郭志忠 (1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 当前主要研究方向为电力系统分析与控制、电力系统光学测量技术、电网网络分析。

(上接第 4 页 continued from page 4)

- [8] 杨武. 电力系统中基于相量测量技术的状态估计仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.

YANG Wu. Simulated State Estimation Based on Phasor Measurement in Power System[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.

收稿日期: 2007-10-11; 修回日期: 2007-11-08

作者简介:

王冰 (1966-), 男, 讲师, 主要从事电力系统自动化及状态估计的研究;

李积捷 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统状态估计方向的研究。E-mail: lijijie-011@163.com