

A Method for On-Line Analysis of Large Power Grid Transient Stability

Yue Li¹, Wenchao Zhang^{1,2}, Xueping Gu¹, Bing Zhao², Yanping Zhang²

¹ Electrical Engineering Department, North China Electric Power University, NCEPU, Baoding, China

² Power System Institute, China Electric Power Research Institute, CEPRI, Beijing, China

liyue@epri.sgcc.com.cn

Abstract: This paper introduces static stability limit to the analysis of transient stability and presents a new fast calculation method of transient stability power limits by studying the relationship among tie-line transmission power limit under transient stability, power impact in tie-lines from post-fault accelerating power and static stability power limit of post-fault power system. Static stability power limits can be calculated by BPA stability program and power impact also can be obtained by simulating only once, and then transient stability power limits can be calculated fast by above-mentioned relationship. The method overcomes the shortcoming of traditional method needing repetitive simulation to approach transient stability power limits and has the appeal of fast speed and accuracy. Through practical case calculations, the proposed techniques have been proven to be able to fulfill the application requirements on stability, effectiveness and calculation efficiency, and could be widely applied in on-line analysis of power system transient stability.

Keywords: transient stability power limits; static stability power limits; power impact; on-line application

大电网在线暂态稳定分析方法

李 岳¹, 张文朝^{1,2}, 顾雪平¹, 赵 兵², 张艳萍²

¹ 华北电力大学电力工程系, 河北保定, 中国, 071003

² 中国电力科学研究院系统所, 北京, 中国, 100085

liyue@epri.sgcc.com.cn

摘 要: 本文通过分析联络线暂稳极限传输功率、故障引起的联络线冲击功率以及事故后联络线的静稳极限传输功率之间的关系, 将静稳极限引入到对于电力系统暂态稳定的分析中, 提出了一种快速求取联络线暂稳极限传输功率的新方法。静稳极限传输功率通过 BPA 稳定程序可以快速求取, 故障冲击功率只需通过一次时域仿真便可得出, 然后基于前面分析的关系便可以迅速得出所要求取的暂稳极限传输功率。该方法克服了现有计算方法需要通过反复仿真逼近稳定极限的问题, 具有操作简单、计算快速、精度较高的优点。实例计算表明所提出方法能充分满足工程应用中的可靠性、有效性和计算效率, 速度上满足在线应用的需要, 可以用于电力系统在线暂态稳定分析。

关键词: 暂稳极限传输功率; 静稳极限传输功率; 故障冲击功率; 在线应用

1 引言

随着电网互联后系统规模的扩大, 网络结构的复杂, 运行方式更加灵活多变, 因此互联对电力系统的安全稳定运行提出了严峻的挑战^[1]。电力系统的暂态稳定分析作为电力系统安全分析的重要内容, 长期应用于离线的计算分析, 对制定运行极限、分析系统极端情况和控制措施起到了不可替代的作用。但由于离线计算只能

计算假想的或一些典型的断面, 而实际的运行方式具有不确定性, 故用离线计算结果指导实际运行存在失配问题, 所以暂态稳定分析在线化具有重要的现实意义和必要性。对于大电网来说, 快速求取区域之间的联络断面暂稳极限传输功率更为重要。

虽然暂态稳定分析应用于在线系统中仍然处于初级阶段, 但电子计算机技术与通信技术的迅猛发展必然为电力系统实时数据信息采集奠定有力的基础。而暂态

稳定各种计算方法也在不断改进和成熟,为准确分析系统暂态稳定性提供有力保障,因此研究可靠快速的暂态稳定分析方法是发展电力系统在线安全分析的重要环节^[2]。时域仿真法可用于研究复杂数学模型表示的电力系统,分析结果准确、可靠,但不能定量描述系统的暂态稳定裕度。而且对于大电网计算稳定极限时其计算速度非常慢,难以满足在线应用要求,因此探索快速的时域仿真法尤其重要。直接法虽可定量分析系统的一摆稳定性,且具有计算速度快的优点,但因其模型适应性差、计算结果不准确,所以没有得到推广应用^[3-5]。近年来,混合法逐渐成为电力系统在线暂态稳定分析方法的主流。其基本思想是将时域仿真法与直接法相结合,充分利用了时域仿真法模型适应能力强、结果可靠的优点以及直接法速度快、能够给出稳定裕度的优点。但直接法的一些近似和假设同时也影响了混合法计算的准确性^[1]。

断面极限功率可以为运行人员调整断面潮流提供定量依据,因此快速的计算联络线暂稳极限传输功率是暂态稳定分析应用于在线的重要部分。本文针对上述方法的不足,提出了一种快速求取暂稳极限传输功率的新方法。该方法通过分析暂稳极限和事故后静稳极限之间的关系,得出一个表述暂稳极限,事故后静稳极限以及故障冲击功率之间关系的表达式。由于静稳极限功率的实用算法是采用稳定程序的,所以对于静稳极限功率的求取较为快速。虽然故障冲击功率是随断面初始潮流的变化而变化的,但经过后面的仿真与分析发现在初始功率处于非极端的水平下估算得到的结果都在合理范围内。因此,只需通过一次仿真便可以得到故障冲击功率。仿真算例对该方法的有效性进行了验证。利用该方法可有效的提高求取暂稳极限传输功率的效率,速度上满足在线应用的要求。

2 暂态稳定极限与静态稳定极限之间的关系

图1为两个区域互联电网的简单接线图,两个区域电网分别用两台等值发电机模拟,则两者之间的交换功率可表示为:

$$P_E = \frac{U_1 U_2}{Z_{12}} \sin(\delta - a_{12}) \quad (1)$$

其中 $Z_{12} = R_{12} + jX_{12} = Z_{T1} + Z_L + Z_{T2}$ 为两区域电网之间的等效阻抗, $a_{12} = \arctg(R_{12} / X_{12})$ 为等效阻抗相角, δ 两台等值发电机之间的相位差。

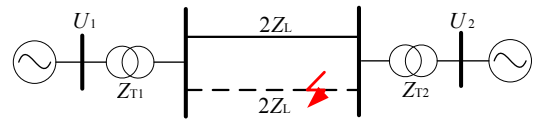


Figure. 1 Electric interconnection chart for two power areas
图 1. 区域互联电力系统简单接线图

由式(1)可以得到该系统的最大交换功率,即静态稳定极限为:

$$P_{slimit} = \frac{U_1 U_2}{Z_{12}} \quad (2)$$

P_{slimit} 表征了系统固有的最大输送能力,与系统电压水平(U_1 、 U_2)和等效阻抗 Z_{12} 有关。当 $\delta = 90^\circ$ 时,是稳定与不稳定的分界点,称为静态稳定极限。在简单系统情况下,静态稳定极限所对应的功角正好与最大功率或者功率极限的功角一致。也就是发电机的出力达到最大值,这就是功角静态稳定的极限。但在多级系统中,功率极限和功角极限却不一致,且这个功率极限值并不是所有机组都达到最大有功出力值。

而一般关心的是系统承受较大扰动事故冲击的能力,因此引入电力系统事故后静态稳定极限:

$$P_{pslimit} = \frac{U_1' U_2'}{Z_{12}'} \quad (3)$$

其中 U_1' 和 U_2' 为事故后系统电压, Z_{12}' 为事故后系统等效阻抗。

如图2所示为事故前后发电机功率—功角特性曲线。

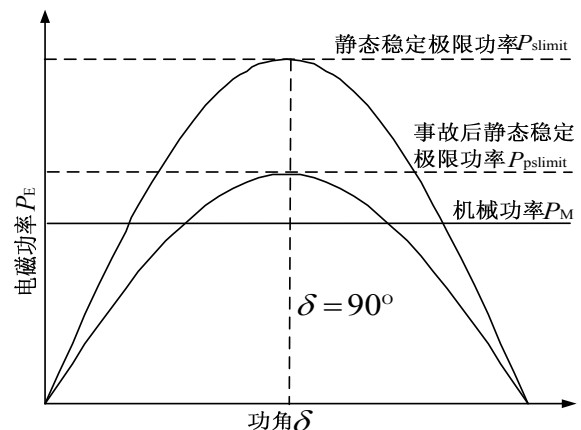


Figure. 2 Power system power-angle characteristics
图 2 电力系统功角功率特性

当在电力系统某些节点发生扰动时,必然产生一定的功率冲击,导致系统内发电机的机械功率和电磁功率之间的不平衡,将引起一个暂态过程。在暂态期间,冲击功率是由各发电机按照不同的准则,如果这些准则在发电机群之间有着显著的不同,则随着每一

次冲击的发生, 各机群间就有振荡的功率摇摆, 它反映从冲击的最初分担到稳态时达到的最终调整这一转变过程。这些功率摇摆在这些发电机群之间的联络线上表现为功率振荡, 如图 3 所示。

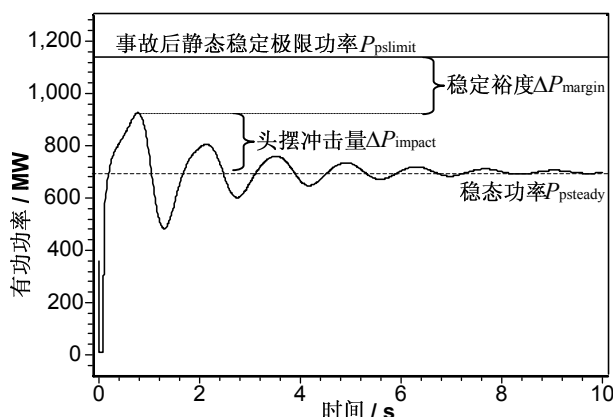


Figure 3 Relationships between the power system stability characteristic quantities

图 3. 电力系统稳定特性各特征量之间的关系

图 3 给出了图 1 所示互联的两个区域电网之间的一回联络线发生三相永久性短路故障保护动作后另一回联络线上功率的振荡摇摆曲线。在图中需要关注几个比较重要的功率量: 事故后稳态功率 $P_{psteady}$ 、故障后联络线的功率头摆冲击量 ΔP_{impact} 和事故后系统的静态稳定极限功率 $P_{pslimit}$ 。为分析方便, 本文假定事故后静态稳定极限功率 $P_{pslimit}$ 基本上保持不变。而实际上随着时间的推移和联络线功率的增大, 发电机内电抗的逐渐变大和系统电压的降低, 事故后静态稳定极限 $P_{pslimit}$ 也是在随之变小, 即系统的稳定裕度 ΔP_{margin} 也在随之变小。因此 $P_{pslimit}$ 保持不变的假定会使对 ΔP_{margin} 的估算偏于乐观。

$$\Delta P_{margin} = P_{pslimit} - (P_{psteady} + \Delta P_{impact}) \quad (4)$$

当稳定裕度 $\Delta P_{margin} = 0$ 时, 系统达到临界失稳条件, 对应的联络线功率 $P_{psteady}$ 为暂态稳定极限。这种结论是基于如图 2 所示的发电机功角达到 $\delta = 90^\circ$ 时系统达到临界稳定的假设条件。但在实际电力系统中系统达到临界稳定的时候发电机功角 δ 要大于 90° , 因此上述结论对 ΔP_{margin} 的估算会偏于保守。

综合上面的分析以及后文的仿真结果可知两种假设条件对计算结果造成的误差会有一定的抵消作用。

从公式 (4) 可导出系统事故后的暂态稳定极限 $P_{ptlimit}$ 为:

$$P_{ptlimit} = P_{pslimit} - \Delta P_{impact} \quad (5)$$

此时系统的稳定裕度 $\Delta P_{margin} = 0$ 。

3 静态稳定极限的求取

3.1 理论分析

前一节引入的事故后静态稳定极限为我们提供了一种新的分析暂态稳定的方法, 它表征了系统能够承受扰动事故的能力, 形象的描述了系统暂态失稳的过程。在大电网中, 送端和受端可以考虑成同步电机, 于是负荷角 δ 是这两个电机转子的相对位置的度量, 超过最大功率点, 送端电机的转矩增加使得 δ 增加, 但是传输功率会减少。这就造成送端电机加速和受端电机减速, 使得 δ 进一步增加, 两个电机将会失去同步。这个能传输的最大功率就是静态稳定极限。

系统发生暂态失稳过程可以这样理解: 并行的重负荷线路中有一回线路跳闸, 造成送受端间的等效阻抗增大送受端电压下降, 事故后剩余联络线的静态稳定极限降低, 涌到剩余联络线的功率超过静态极限造成送端机组相对于受端机组功角失稳。应用事故后静态稳定极限于暂态稳定分析中, 可以使得暂态失稳过程更形象更易于理解。电力系统故障消除后, 在恢复到正常运行方式前所出现的短期稳态运行方式是事故后运行方式。

静态功角稳定实用算法是采用稳定计算程序, 逐步增加送端机组的功率或减少送端电网负荷, 相应地减少受端的机组功率或增加受端的负荷, 求得输电线路或断面最大输送功率即为静态功角稳定极限。计算过程中应尽量保证系统的频率和电压在正常范围内, 因此, 要考虑调速系统和励磁系统, 并保证增减功率基本平衡。同时应注意功率的增减方案要符合实际的功率流向, 不同的方案可能得到不同的静态稳定极限。在本文的算例分析中, 事故后静态稳定极限的求取方法是在稳定程序中首先做对于暂稳极限约束故障的模拟, 在故障平息后做对于静态极限求取的计算。由于是采用稳定程序计算, 所以相对于传统求取暂稳极限的反复仿真逼近极限的方法来说要快速的多。

3.2 算例分析

本节以福建外送系统为例进行仿真计算和分析, 采用 BPA 仿真程序进行求取。在本算例中, 福建外送断面通过浙江宁德-福建双龙双回线组成, 其中宁德-双龙线路长度 254km, 导线型号为 LGJ-300×4。由于福建外送暂稳极限传输功率的约束故障是宁德-双龙

线双龙侧三永故障，所以在稳定程序中 0 周波做该约束故障的模拟，4.5 周波故障侧近端切除 5 周波远端切除，10 周波开始进行静稳极限的计算。在计算过程中保证系统的频率和电压在正常范围内，功率增减方案采取增加福建机组的出力，同时减小江苏机组的出力，使得求取的静稳极限处于平均水平。经计算，福建外送断面事故后静稳极限为 3340MW，图 4 为福建外送断面达到 3340MW 时的有功功率曲线，此时福建地区机组相对华东主网失步。

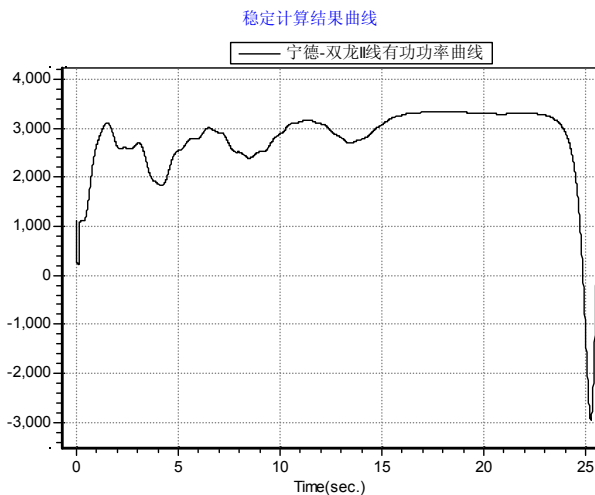


Figure. 4 Static stability power limit for the Fu Jian delivery system

图 4 福建外送静稳极限

由于是采用稳定程序计算，避免了求取暂稳极限面临的调潮流的繁琐，所以求取静稳极限在速度上要明显优于暂稳极限的求取。

4 联络线暂态稳定极限功率快速算法

4.1 方法描述

以互联系统中薄弱的联络线为中心，互联电网均可视为如图 1 所示的两区互联系统，计算该系统的暂态稳定极限传输功率的具体步骤如下：

第一步，计算互联电网事故后互联系统的静态稳定极限功率 $P_{pslimit}$ 。

第二步，使用数值仿真程序对该系统进行发生暂稳极限约束故障的模拟，从仿真曲线中计算出叠加在薄弱断面事故后稳态功率 $P_{psteady}$ 上的冲击功率 ΔP_{impact} 。

第三步，基于公式 (5) 计算系统的暂态稳定极限传输功率 $P_{ptlimit}$ 。

4.2 算例分析

4.2.1 单厂送出系统

如图 5 为托克托电厂单厂送出系统的接线图，托克托电厂经四回 500kV 线路送电到浑源站再分别经过两回线到安定和霸州向主网送电。

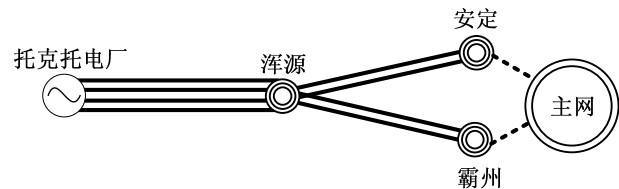


Figure. 5 Electric connection chart for the transmission system of Tuo-Ke-Tuo power plant

图 5. 托克托电厂送出系统接线图

托克托电厂送出系统与如图 1 所示系统比较相似，只是另一端（主网）的容量相对非常大，因此该系统可以认为是一个单机无穷大系统。

图 5 给出了托克托电厂四回线外送 4565MW 时 N-1 三永故障后单回线功率曲线与 N-1 检修时单回线功率微增失稳曲线的对比情况，功率微增曲线的最高点（为事故后静稳极限 $P_{pslimit}$ 点）与 N-1 三永故障摇摆曲线的最高点非常接近，说明采用公式 (5) 估算暂态稳定极限具有很好的精度。

根据公式 (5)，通过求得事故后静态稳定极限和故障冲击功率值，在满足一定精度的条件下可快速计算出暂态稳定极限值。

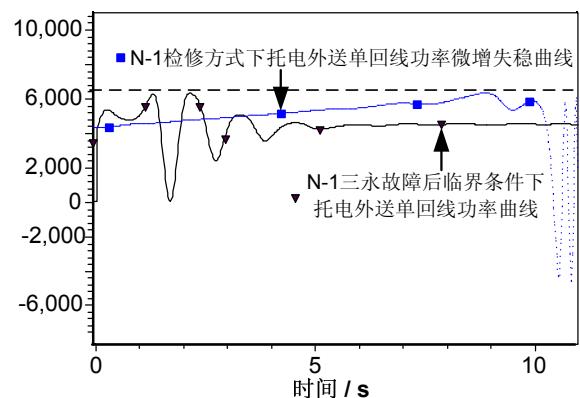


Figure 6. Comparison of the transient stability limit and the post-fault static stability limit

图 6. 暂稳极限传输功率和静稳极限传输功率比较

经过仿真计算得知托电外送暂稳极限传输功率为 4565MW，静稳极限传输功率为 5950MW。表一为使

用公式(5)对托电外送系统暂稳极限传输功率进行估算的误差统计表。 P_0 表示托电四回线外送的初始功率, ΔP_{impact} 表示对应不同初始功率N-1故障后的冲击功率大小, P_{pslimit} 则为根据不同初始功率条件下对应的冲击功率估算得到的暂态稳定极限, P_{pslimits} 为通过传统的反复逼近法得到的暂态稳定极限, 而 P_{pslimit} 则为事故后的静态稳定极限。

Table 1. Deviations between the actual value and the estimate values of the transient stability limit
表 1. 托电外送不同功率时暂态稳定极限估算误差

P_0 (MW)	ΔP_{impact} (MW)	P_{pslimit} (MW)	P_{pslimits} (MW)	P_{pslimit} (MW)	误差
4050	1479	4471	4565	5950	-2.06%
3451	1483	4467			-2.14%
2852	1447	4503			-1.36%
2253	1312	4638			1.59%

从误差统计来看, 对于托电外送正常运行方式, 根据算法计算得到的暂稳极限传输功率误差均可控制在5%以内, 在精度上完全可以满足工程应用的要求。

4.2.2 区域互联系统

多机电力系统模型更符合现代电力系统的实际情况, 它虽然比单机无穷大系统复杂得多, 但从暂态稳定性的角度来看, 在多机系统中, 制约系统(或发电机)暂态稳定性的主要矛盾仍然是发电机机械转矩过剩、电磁转矩不足而导致发电机转子不断加速失步。任何区域互联系统, 均可等效为以系统的薄弱点(大多数情况下为互联电网的联络线)为中心的两机系统。因此, 对于互联电网的多机电力系统, 采用本文所提出的暂稳极限快速计算方法估算系统的暂态稳定极限同样适用。

本节将以前面提到的福建外送系统为例进行分析计算, 并且对外送功率在不同水平下的冲击功率进行计算。表2为对福建外送系统进行仿真计算得到的故障冲击功率 ΔP_{impact} 随初始运行功率 P_0 变化而变化的结果, 以及暂稳极限传输功率 P_{pslimit} 估算结果的误差统计情况。

Table 2. Deviations between the actual value and the estimate values of the transient stability limit for the Fu Jian delivery system
表 2. 福建外送不同输送功率情况下的故障冲击功率及估算误差

P_0 (MW)	ΔP_{impact} (MW)	P_{pslimit} (MW)	P_{pslimits} (MW)	P_{pslimit} (MW)	误差
2500	595	2745	2650	3340	-3.6%
2000	795	2545			4.0%
1500	820	2520			4.9%
1000	770	2570			3.0%
800	760	2580			2.6%
500	730	2610			1.5%

对福建外送系统的仿真对比结果表明: 像福建外送这样的小送端大受端系统的 ΔP_{impact} 随 P_0 的变化趋势同单厂送出系统的趋势是一致的。虽然 ΔP_{impact} 在 P_0 不同时会有差别, 但是在不同 P_0 水平下通过所提算法计算得到的暂态稳定极限传输功率的误差均在合理的范围内, 这说明不同 P_0 水平下求取的 ΔP_{impact} 对估算结果准确性的影响不是很大, 所以只要 P_0 在非极端水平下求取的 ΔP_{impact} 都可以应用到求取暂稳极限传输功率的表达式中。因此, 只需通过一次仿真便可以得出 ΔP_{impact} , 大大的提高了传统求取暂稳极限传输功率方法的效率, 在速度上满足在线应用的要求且具有很高的精度, 实例证明该方法可以应用到对于电力系统暂态稳定的在线分析中。

5 结论

本文提出的快速计算暂稳极限传输功率的方法, 创新点在于抓住了暂态稳定极限与事故后静态稳定极限之间的关系, 优点在于避免了传统方法遇到的反复仿真逼近稳定极限的问题。由于静态稳定极限和故障冲击功率的求取较为简单, 所以使用本方法将会为系统分析人员节省大量时间。从大量的仿真结果看, 应用该方法估算的结果精度上满足工程使用的要求, 可以应用于电力系统暂态稳定在线分析中。

致 谢

本论文是在张文朝师兄和导师顾雪平教授以及赵兵博士的精心指导下完成的。衷心感谢三位指导老师的教导和关心, 在论文和课题的工作课程中, 三位老师为我从事的课题顺利进行提供了宽松、优越的科研条件, 而且在课题进展的关键阶段给予了极为重要的指导。借此论文完成之际, 谨向张文朝师兄, 导师顾

雪平教授，赵兵博士致以诚挚的敬意和深深的感谢！

References (参考文献)

- [1] Xia Chengjun, Ru Feng, Xu Yang. Summary of the On-line Transient Stability Analysis and Control System for Large Power Grid. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2004, 23(4), P1-5.
夏成军，茹锋，许扬，大电网在线暂态稳定分析与控制系统研究综述，*江苏电机工程*，2004，23(4)，P1-5.
- [2] Sun Wen, Fang Dazhong, Xue Zhenyu, A Method For On-line Analysis of Power System Transient Stability, *Power System Technology*, 2009, 33(14), P16-20.
孙闻，房大中，薛振宇，电力系统在线暂态稳定分析方法，*电网技术*，2009，33(14)，P16-20.
- [3] LIU Sheng. Power system transient stability analysis using the transient energy function methods. *Power System Technology*, 1995, 19(2):11-17.
刘笙. 电力系统暂态稳定分析的能量函数方法. *电网技术*，1995，19(2):11-17.
- [4] Fouad AA , Vittal V. Power system transient stability analysis using transient energy function method. Prentice Hall, 1990
- [5] Xue Y, Van Cutsem T, Ribbens-Pavella M . A simple direct method for fast transient stability assessment of large power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(2), May 1998:400-412.