

不可积项和临界能量^①

—关于暂态能量函数的几点注释

PATH DEPENDENT TERMS AND CRITICAL ENERGY
—NOTES ON TRANSIENT ENERGY FUNCTIONS

薛禹胜

(南京自动化研究所)

Xue Yusheng (Nanjing Automation Research Institute)

提 要

由于电力系统的非自治性，暂态稳定分析用的能量函数不可能完全满足李雅普诺夫函数的定义条件。为了求取临界能量值，所有能量函数型的直接法都需要对系统轨迹作出某种近似假设。显然，不同的假设造成了不同的特性。本文从这个新的观点来归纳、比较了具有代表性的 RUEP 法、PEBS 法、加速度法、结构保持模型、时间尺度解耦法及 EEAC 等直接法。本文还进一步分析了这些方法在复杂模型下可能的表现和开发的前景。

ABSTRACT

All successful direct methods are heuristic in a certain sense. Different assumptions are set forth in various methods to treat path dependent terms of transient energy functions and to calculate the critical energy. In this paper, distinguished representatives of direct methods are investigated in this viewpoint, and prospects of applying them to detailed models are discussed as well.

一、前 言

用直接法分析电力系统暂态稳定性的过程包括三个基本步骤。(1) 针对故障后的系统最终结构定义一个李雅普诺夫函数 V ；(2) 对该特定的故障，找到函数的临界值 V_1 ；(3) 将故障中的系统方程积分直到 $V = V_1$ ，此时的时间即为故障临界切除时间 t_1 ；或者积分到故障的实际切除时间 t_c 为止，若 $V(t_c) > V_1$ 则系统不稳定，若 $V(t_c) \leq V_1$ 则系统稳定。

25 年来的努力集中在寻找好的 V 函数，正确地估计 V_1 以及计人详细的模型^[1, 2]。

对于经典模型来说，直接法已经达到实用水平。经过长期筛选，它们已经无一例外地采用了不同形式的能量型标量 V 函数。这种函数由扰动期间注入电力系统的暂态动能和暂

①1990年11月收稿

态势能所组成，因而具有明确的物理意义。

但是电力系统对于暂态能量来说并不是封闭的。耗散的这部分暂态能量是与实际的受扰轨迹有关的，而 V 对于时间的导数具有不确定的符号。因此从物理概念来说，多机电力系统严格的李雅普诺夫能量函数是不存在的。

多机系统状态空间中的点与能量函数的取值并不是单值对应的，后者必须由该点及到达该点的轨迹共同确定。同样，能量函数的极限值也不能仅用状态空间中某个不稳定平衡点 (UEP) 来反映，而必须同时识别出从该 UEP 出发，到达系统最终结构的稳定平衡点 (SEP) 的临界能量轨迹 (请与临界受扰轨迹相区分)。我们在这里要特别强调的是与上述临界能量轨迹对应的是系统最终结构的 SEP (P)，而不是原始结构的 SEP (O)。上述临界能量轨迹是从数学观点虚构出来的，缺乏有意义的物理概念，也无法精确求解。文献中常以故障临界切除下的临界受扰轨迹来近似代替它，不幸的是上述本质区别往往被掩盖了。事实上即使当系统最终结构等于原始结构，SEP (P) 和 SEP (O) 重合的情况下，故障临界切除下的受扰轨迹表面上是和 SEP (P) 联系在一起了，但是仍不是临界能量轨迹。这是因为我们不可能知道系统将如何在最终结构下，从该 UEP 处回到 SEP (P)。这个问题在 SEP (P) 和 SEP (O) 不同时 (例如最终结构下有支路被切除的情况)，就更容易看出了。

所有最后成功的直接法在求取 V_1 时都考虑到特定的故障条件，从而克服了早期把临界能量独立于故障来计算而带来的严重保守性。这方面的开创性贡献是由文献 [3-5] 作出的。并被此后开发的新方法^[6-8] 所继承。

各种方法的关键不同处在于它们对临界值 V_1 的估计方法。按照本文的观点，可以进一步叙述为它们估计临界能量点和临界能量轨迹的不同方法。所有成功的直接法都对系统受扰轨迹作了近似处理。

而所有这些方法都是启发性的，都建立在各自的经验性假设的基础上。对这些近似假设的合理性虽然可以给出一定的物理解释，但却不可能给出严格的证明。最后验证的方法只能是在不同特性的系统、不同的原始工况和不同的扰动的组合下进行大量的仿真计算，并用数值积分法来校核其精度。

本文将讨论具有代表性的各种直接法对系统临界能量所采用的近似假设，揭示这些方法的不同和它们内在联系。我们认为，从这个新的角度来归纳比较直接法，对于进一步理解和开发直接法是有很大好处的。

二、相关不稳定平衡点法 (RUEP)

在经典模型下，影响多机系统直接法精度的因素主要有两个：(1) 在计算 V_1 时，采用了离 SEP (P) 最近的 UEP 或者其它不相关的 UEP；(2) 为了得到与积分路径无关的能量函数值而忽略了转移导纳。对于前一个问题，Athay 等人率先作出了重大贡献^[3]。他们考虑到实际的受扰轨迹，利用一个相当复杂的搜索优化过程在众多的 UEP 中选择相关的那个 UEP (RUEP)。由于在能量函数中考虑了转移导纳， V 的负定性得不到保证，因此 V 不是真正的李雅普诺夫函数。从 SEP (P) 到 RUEP 的临界能量轨迹被处理为角度空间中的线性运动。这意味着所有机组，包括临界机及非临界机在内，都以各自的匀速度

从 RUEP 运动到 SEP (P)。这样的假设当然不可能是真实的，按此而得的与路径有关的积分项也必然含有误差。我们不但不可能在理论上进行严格的误差分析，甚至难以给出误差的上界。

Fouad 等人^[6]进一步改进了 Athay 的方法。例如，引入了动能修正，提出了能量裕度的概念，并明确提出了 RUEP (又称 CUEP) 的定义是在实际受扰轨迹方向上所有 UEP 中，对应于规范化的能量裕度最小的那个 UEP。这个研究小组还提出了单机能量函数方法，以更好地反映暂态稳定问题的本质。但是仍然无法保证 V 的负定性，也没有给出确定临界机的有效方法。

在求取 RUEP 的算法上，由于收敛的目标是不稳定的平衡点，因此对所采用的非线性规划方法的收敛性要求很高。为此经历了一系列的改进，但仍然存在着困难。另一方面，对于临界能量轨迹则仍采用 Athay 的处理方法。

三、势能边界法 (PEBS)

文献[4]开创的 PEBS 法利用特定的受扰轨迹，寻找状态空间中的稳定域局部近似，从而有效地避免了求取 RUEP 的困难。

这个方法利用永久性故障下的轨迹来近似故障临界切除时的受扰轨迹，并找到该轨迹上最大的暂态势能值作为临界能量 V_1 。而曲面 $\{ (X, \dot{X}) : V(X, \dot{X}) < V_1 \}$ 则作为状态空间中稳定域的局部近似。而通过沿着受扰轨迹观察总的暂态能量到 V_1 的时间就是临界切除时间。这个方法也是基于启发性知识而推导出来的。PEBS 的穿越点不一定是某个 UEP，但是它们都在等势曲面的正交面上，该正交面在 UEP 和穿越点之间较为平坦，从而可用该穿越点代替 RUEP。文献[9]指出 PEBS 实际上是与原经典模型多机系统相关的梯度系统的稳定边界。

PEBS 法根据永久故障下的受扰轨迹来确定计算临界能量的轨迹，这是缺乏严格的物理意义的。虽然可以用迭代方法来改进 V_1 值，但是当 SEP (P) 不等于 SEP (O) 时，临界能量对应的计算轨迹还要进一步加入其它的近似假设。

为了克服 PEBS 法可能出现的局部的、不相关的 UEP，Van Cutsem 等人提出了有效的克服措施^[10]，从而使 PEBS 法克服局部的极值点，而变得强壮些。

四、加速度法

文献[5]提出的加速度法则是建立在求解近似的 UEP 上。它按初始加速度来判断率先失稳的机组 i (也可以是几个机组)。这样一来，近似的 UEP 可以表示为：
 $\theta'' = (0, \dots, 0, \pi - 2\delta_i^*, 0, \dots, 0)$ 。而近似的临界能量值 $V_1 = V(\theta'', 0)$ ，并可在对受扰轨迹积分的过程中对临界机组的辨识和 V_1 进行必要的修正。对临界能量轨迹或者不考虑 (即忽略转移电导) 或者按线性近似轨迹考虑。显然不论是辨识该近似的 UEP，还是计算所依据的临界能量轨迹也都是经验假设性的。

五、结构保持模型 (SPM)

Bergen 等^[7]保留了网络拓扑结构，不再把导纳阵收缩到发电机内部接点。由于此时的转移导纳只由支路阻抗组成，不再包含负荷分量，因此忽略由其引起的路径相关项不再会引起重大误差。但其代价是计算量的大大增加。

由于在经典模型下的能量函数中不再包含与路径相关的积分项，因此多机系统状态空间中的点与能量函数的取值成为一一对应的。为了求取临界能量，不再需要假设有关的轨迹。而代表临界能量的状态点则可以由以前讨论的各种方法来确定。

另一方面，文献[10]指出甚至在某些经典模型的情况下，SPM 的结果也不如降阶模型的结果好。这样，所付出的代价就可能不合理。当然 SPM 的本意是要计及非线性负荷，但笔者的经验是由于新的路径相关项的出现，SPM 的强壮性尚有待改进。

六、时间尺度解耦法 (TSD)

Kokotovic 等提出的 TSD 法^[11]是建立在如下猜想上的。系统的动态包含着慢速分量和快速分量。前者对应于不同机群之间的相对运动，而后者则对应于同一机群内各机组间的相对运动，TSD 认为这两者之间的耦合很小，可以解耦处理为区域模式和局部模式。

虽然验证 TSD 的结果发表得不多，但是 TSD 的概念却十分清晰，对后来的 TSA 方法起了很大的作用。

七、扩展等面积法 (EEAC)

最早的直接法大约是用于单机无穷大系统 (OMIB) 上的等面积法了。在此基础上建立的能量函数严格讲来，只限于 OMIB 系统。笼统地讲，上述各种能量函数法都可以看作是其概念的延拓，但是推广到多机系统的能量函数不再是李雅普诺夫函数了。另一方面，对应的直接法虽然比 SBS 法快了，但还是远远不能满足在线应用的要求。由于等面积法简单而物理概念清晰，几十年来吸引了许多学者试图把它扩展到多机系统。

1986 年问世的 EEAC 法较好地解决了这个问题^[8]。它利用动态凝聚把多机系统的 TSA 问题变换为一个等值的 OMIB 系统的二阶模型。在这个二维的状态空间中，计入转移导纳后的势能函数可以表示为一个与路径无关的单重单维积分，进而用解析式表示了该积分值。由于临界点和对应的轨迹都是唯一的，并可解析求取，TSA 问题和暂态稳定预控制问题被真正直接地解决了。

当然，要把一个本质上不可积的问题简化为一个可积的模型，必然隐含了对轨迹的某种假设。对于一个指定的扰动，EEAC 把多机系统分解为临界机群和剩余机群两个子集。然后按部分角度中心 (PCOA) 等值概念变换为一个等值的两机系统，后者又可以变换为一个等值的 OMIB 系统，从而可以使用等面积准则。第二个变换的本身是严格的，而 PCOA 等值则反映了我们对受扰轨迹的假设。同一群中的所有机组的运动轨迹都由该群的 PCOA 运动轨迹来代替，这相当于忽略了同一机群中，不同机组间的相对动能和势能。其物理解释是两个机群各自内部的暂态能量只反映了该群内各机组的相对运动，而对两个群之间的失步影响不大。因此当我们只对这两群之间的失步感兴趣时，就可以把每个机群看为是一台按 PCOA 轨迹运动的等值机。在这个假设的前提下，即使计及转移导

纳，临界能量点和临界能量轨迹仍是唯一的。也就是说，在 PCOA 等值的含义上，EEAC 是严格的李雅普诺夫准则。

最近，由美国国家科学基金资助的一份研究报告^[12]在对各种直接法进行分析比较后明确指出：EEAC 包含了 RUEP、PEBS 和 TSD 这些方法的主要贡献，而它的势能函数可积的特点使它比其它方法更为优越。

八、不同的轨迹近似

所有在经典模型下获得成功的直接法都建立在各自的经验假设上。我们可以对这些假设作出一定的物理解释，但是却不可能严格地证明它们，也难以通过分析来比较各自的精度。唯一的方法是在不同特性的电力系统，不同的运行方式，各种故障下大量仿真来考核。即使对一个误差分布十分分散的不佳方法来说，要找个别与精确结果接近的算例也不是很困难的，因此穷举式的考核对于建立在经验假设上的方法来说是十分必要的。

如果多机系统的直接法要考虑恒阻抗负荷，看来有两种方法。即要么定义近似的临界能量点和临界能量轨迹（包括结构保持模型方法），要么先对同调群机组的运动轨迹作近似处理将问题简化为与路径无关。

对于前一类处理方法，误差来自临界能量点和临界能量轨迹的定义和求解。笔者认为还有一个误差源至今尚未有文献提及。前言中谈到应用直接法的第三步是将故障中的系统方程积分，当 $V = V_1$ 时即得到临界切除时间 t_1 。事实上这只对真正的李雅普诺夫函数才正确。否则，非封闭的能量函数在 t_1 以后不能保持不变。在 RUEP 法中难以克服的这一点在计人复杂模型后将变得更为突出。

后一种处理方法，误差来自忽略了机群内部的相对运动。当系统明显地分为二个以上的群时，简单地处理为两个群误差可能会较大。有关的研究工作仍在进行之中。

九、复杂模型下的展望

上面提到的两大类方法的差别在复杂模型下将变得更为显著。

从能量函数的构成角度来看，复杂模型所增加的变量可以（A）作为新的动态变量而以新的项出现在“能量函数”中，或（B）作为参数变化，而影响经典模型下的能量函数^[13]。

由于方案（A）在能量函数的定义，符号不定性，新增项的加入不再有能量守恒的物理含义，UEP 的含义变得模糊，求取困难，临界能量轨迹的定义等一系列严重困难，使得在经典模型中已解决或不太关键的误差因素大大重要起来。文献上的报导还远不能令人满意。例如，在多机系统中还不能有效地反映 E_q' 的变化，因为要做到那样，就将出现无理函数，使 V 函数的构造十分困难。Sasaki^[13]提出的方案（B）保持了能量函数的物理概念，是很有前途的，但是在多机系统中的计算量太大了，实用性上存在困难。

属于第二类直接法的 EEAC 法由于已经简化为二阶系统，因此采用方案（B）将没有本质上的困难。按此原则开发的 E_q' 变化及 AVR 模型已经等到出乎意料的成功。

笔者认为，在任何情况下，直接法都必须保持其速度的明显优势，否则就会大大减少其生命力。直接法在对模型的适应性方面还会不断取得进展，但无论如何也是赶不上 SBS 方法的。在这一方面，结合知识工程技术是有很大好处的。

十、结 论

所有多机系统的直接法都建立在经验性的假设上。对近似算法的精度进行评估不能单纯依靠理论分析，也不能光凭借少量的算例。

将复杂模型引入的新变量直接加入能量函数会遇到从定义到求解技术各方面的严重困难。由于引入了新的不可积项，不能指望它们在故障切除后保持不变，在经典模型中已经克服的精度问题将再一次出现。

将复杂模型的新变量作为参数而间接影响与经典模型相同的能量函数的方法可能是较好的途径。

参 考 文 献

- [1] Bose, S., Application of direct methods to transient stability analysis of power systems. IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, 1984, pp.1629-1636
- [2] Pai.M.A., Energy function analysis for power system stability (BOOK), 1989
- [3] Athay, T., podmore, R. and Virmari, A practical method for direct analysis of transient stability. IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, PP.573-584, 1979
- [4] Kakimoto, N., and Hayashi, M., Transient stability analysis of multimachine power system by Lyapunov's direct method, Proc. of 20th IEEE Conf. on CDC, 1981, pp.464-470
- [5] M.Ribbens-Pavella, Lj.Grujic, J.Sabatel and A. Bouffioux, Direct methods for stability analysis of large scale power systems, IFAC Symposium on Computer Applications in Large Scale Power Systems, New Delhi, India, 1979
- [6] Fouad, A.A., Stanton, S.E., Mamandur, K.R.C. and Kruempel, K.C., Contingency analysis using transient energy margin technique, IEEE trans. on PAS, Vol.PAS-101, No.4, 1982, pp. 757-766
- [7] Bergen, A.R., and Hill, D.J., A structure preserving model for power system stability analysis, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, 1981, pp.25-35
- [8] Xue, Y., Van Cutsem, Th and Ribbens-Pavella, M 'A simple direct method for fast transient stability assessment of large power system', IEEE Trans. Power Systems, Vol. PWRS-3 (May 1988) pp. 400-412
- [9] Chiang, H.D., Wu, F.F. and Varaiya, P.P., Foundations of direct methods for power system transient stability analysis, IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol. CAS-34, Reb. 1987, pp.160-173
- [10] Van Cutsem, Th., Toumi, B., Xue, Y., and Ribbens-Pavella, M., Direct criteria for structure preserving models of electric power systems, IEAC Symp. on Power system and Power Plant Control, Beijing, China, Aug. 1986, pp. 258-263
- [11] Kokotovic, P.V., Avramovic, B., Chow, J.H and Winkelman, J.R., Coherency-based decomposition and aggregation, Automatical, Vol.18, 1982, pp.47-56
- [12] Miah, A.M., Meisel, J., and Cory, B.J., Transient stability assessment using a dynamic equivalent for undisturbed generators, PSCC 1990, pp.501-508
- [13] Sasaki, H., An approximate incorporation of field flux decay into transient stability analysis of multimachine power system by the second method of Lyapunov, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, 1979, pp.473-483