

基于时域仿真的暂态稳定判据及在事故扫描中的应用

陆丹丹, 王建全

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为解决基于时域仿真的电力系统暂态稳定判断时,传统的角度判别准则引起大量的数值计算的问题,将单机等效法(SIME)辨识方法应用于电力系统时域仿真计算中。通过对该方法下EAC法则对减少电力系统暂态稳定时域仿真时间的研究,提出了一种暂态稳定判据,称为EAC判据。其基本思想是将多机系统等效为单机无穷大(OMIB)系统,随着时域仿真的计算,逐步更新OMIB系统,若满足EAC法则,则停止计算。最后将EAC判据和角度法准则分别应用于基于时域仿真算法的快速事故扫描器中,对EAC判据的有效性和准确性进行了评价。基于两个实例的计算结果比较,结果证明,与传统的角度判别准则相比,EAC判据能够大大减少电力系统暂态稳定时域仿真时间。

关键词: 时域仿真;暂态稳定判据;快速事故筛选;单机等效法;单机无穷大;EAC

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)06-0709-05

Transient stability criterion based on time-domain simulation and its application in contingency screening

LU Dan-dan, WANG Jian-quan

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the transient stability computation problem caused by the use of angle criterion during the power system assessment, a transient stability criterion called EAC method was proposed, after the research of the EAC, which helps reducing the computation time, by applying single machine equivalent(SIME) method in the transient stability based on time-domain simulation. The criterion based on SIME, replaces a multi-machine power system by an one-machine system, and refreshes the date of the one machine infinite bus(OMIB) system at each step of the simulation, terminates the computation when it fits the EAC, and also decide if it is (un) stable. The EAC method and the angle criterion were both applied in the contingency screening, and the effectiveness of EAC method was evaluated. The results of two simulations on different systems, indicate that the EAC method could reduce the transient stability computation time.

Key words: time-domain simulation; transient stability criterion; contingency screening; single machine equivalent(SIME); one machine infinite bus(OMIB); EAC

0 引 言

快速事故扫描法作为电力系统动态稳定分析的重要组成部分,希望能够在最短时间内将预想事故集中无害预想事故(即在该事故下系统明显稳定)过滤掉,而将可能对系统稳定造成威胁的有害事故筛选出来,并进行详细的分析^[1-2]。目前的快速事故扫描法

有基于时域仿真法^[3]、基于能量函数法^[4-6]、性能指标法^[7-11]等。采用的算法不同,稳定判据也不同。例如能量函数法基于暂态能量的求取,目前比较成熟的方法主要有势能边界面法(PEBS)、扩展等面积法(EAC)等;而性能指标法是通过计算临界切除时间、发电机临界功率等来进行事故筛选的。这些方法用起来很不方便,要受到调节装置负荷及发电机模型的限制。

收稿日期:2011-12-28

作者简介:陆丹丹(1987-),女,浙江上虞人,主要从事电力系统稳定与控制方面的研究。E-mail: ldd19711@163.com

基于时域仿真的快速事故扫描法准确度高,能适用于任何复杂模型,目前在提升计算速度方面也得到了很大的改进。例如利用大步长仿真得到事故的临界切除时间、二阶经典模型的预估-校正法、高阶泰勒级数法等^[12]。但是基于时域仿真的快速事故扫描中若用传统的角度判别准则来判断系统在当前故障下的稳定性,计算时间过长。

文献[13-14]避免了多机系统建模及线性化的繁琐过程,在基于时域仿真法的基础上,将多机系统等效为一个单机无穷大系统,快速求解稳定裕度,如临界切除时间和临界能量等。对于快速事故扫描法来说,目的是能够快速过滤出无害预想事故,留下有害预想事故以进行进一步的详细分析,所以不需要具体求解临界切除时间或者稳定裕度。

在该思想的启发下,同时针对传统的角度判别准则引起的大量的数值计算的问题,笔者提出一种暂态稳定判据,称为EAC判据。该方法基于时域仿真计算,采用SIME辨识方法,实现多机系统到单机无穷大系统的映射,并以EAC法则作为电力系统是否稳定的判据。本研究将该判据和传统的角度法准则判据分别应用于快速事故扫描计算中,基于两个实例的计算,通过比较计算结果,证明EAC判据能大大提升计算速度,适用于快速事故扫描计算。

1 暂态稳定判据研究

单机等效方法(SIME)的主要思想是:将等面积准则扩展到多机系统。对于给定故障,在故障清除后的每个时域仿真步,将全部发电机分为两个候选机群,即R群(临界机群)和B群(剩余机群),分别用一台等值机代替,再等值成单机无穷大(OMIB)系统,成为候选的OMIB系统。随着时域仿真的进行,如果有新的候选OMIB系统形成,则加入到候选OMIB系统群中,并在以后每个积分步更新所有候选机群的运行参量。

EAC判据的思想是:在时域仿真基础上,采用SIME辨识,以EAC法则作为暂态稳定判别条件,当候选的OMIB系统满足EAC法则时,停止计算。算法实现如下:

(1) 在每一个时域仿真计算步后,本研究根据时域仿真数据,将各发电机功角 δ 从大到小排列,计算每两台相邻发电机之间的功角差 $\Delta\delta_{ij}=\delta_i-\delta_j$,取其中最大功角差 $\Delta\delta_{ij\max}$,则1-i台机组归为R群,j-n机组归为B群。

本研究用中心惯量法,将两机群分别等效成一个单机无穷大系统,同时要将前面时域仿真步骤计算中

产生的候选机群的数据更新。等效机群R群和B群形成的单机无穷大系统等值参数计算如下:

R群发电机等值参数发电机功角和角速度分别为 δ_R, ω_R 计算如下:

$$\delta_R = M_R^{-1} \sum_{k \in R} M_k \delta_k \quad (1)$$

$$\omega_R = M_R^{-1} \sum_{k \in R} M_k \omega_k \quad (2)$$

其中: $M_R = \sum_{k \in R} M_k$, $k=1,2,3 \cdots i$; M_k —第 k 台发电机的惯性时间常数; δ_R, ω_R —第 k 台发电机的功角和角速度; M_R —R群等值惯性时间常数。B群等值参数 M_B, δ_B, ω_B 计算方法同上;

(2) 本研究将步骤(1)中产生的候选等效机群形成OMIB系统。按照时域仿真数据,逐步计算OMIB系统的等值变量功角 δ_{OMIB} 、角速度 ω_{OMIB} 、电磁功率 P_{eOMIB} 、机械功率 P_{mOMIB} 、加速功率 P_{aOMIB} 、加速功率关于时间的导数 dP_{aOMIB}/dt 。OMIB系统参数的计算如下:

$$\delta_{OMIB} = \delta_R - \delta_B \quad (3)$$

$$\omega_{OMIB} = \omega_R - \omega_B \quad (4)$$

$$P_{mOMIB} = M (M_R^{-1} \sum_{k \in R} P_{mk} - M_B^{-1} \sum_{j \in B} P_{mj}) \quad (5)$$

其中: $M = M_R M_B / (M_R + M_B)$, 用同样的方法得到 $P_{eOMIB}, P_{aOMIB} = P_{eOMIB} - P_{mOMIB}$ 。

(3) EAC法则: t 表示时域仿真当前时刻, t_0 为故障清除时刻,若电力系统稳定,则功角返回时刻以 t_r 表示,若电力系统不稳定,则系统失稳时刻以 t_u 表示。EAC法则描述如下:

电力系统暂态不稳定判断:在 $t > t_0$ 的某时刻,有OMIB系统运行参量满足以下条件,即 $\omega_{OMIB(t)} > 0$, $P_{aOMIB(t)} > 0$,且 $dP_{aOMIB}/dt > 0$,此时为系统失稳,失稳时刻 $t_u = t$;

电力系统暂态稳定判断为:在 $t > t_0$ 时,满足 $\omega_{OMIB(t)} > 0$,随着仿真计算的进行,若在某时刻 $t_r (t_r > t_0)$,满足条件 $\omega_{OMIB(t_r)} = 0$, $P_{aOMIB(t_r)} < 0$,则系统稳定,功角返回时刻 $t_r = t$ 。

2 算例分析

该测试系统采用新英格兰10机39节点和国内某电网,发电机采用经典1型(E'_q 恒定),负荷采用恒阻抗模型。本研究分别将角度法则和EAC判据应用于快速事故扫描器中。该事故扫描器基于隐式梯形积分算法,开发工具采用Visual C++。本研究通过比较不同判据下两者的计算结果来证明EAC判据的有效性。因不加调速器和励磁器的作用,时域仿真时间设

为1.5 s。

应用EAC判据的事故扫描器程序实现如图1所示。在每个时步,通过时域仿真得到电力系统的运行变量后,本研究根据图1描述的流程,将多机系统等值OMIB系统,并计算相应的等值参数,如果当前时步下,系统不满足EAC判据,则继续下一时步的时域仿真计算,如果满足EAC判据,则按照EAC判据进行电力系统是否暂态稳定的判断,如果稳定,则该预想事故归为无害预想事故,如果不稳定,则归为有害预想事故,以进行进一步的详细分析。同时本研究为比较两种判据所引起的计算量,事故扫描器停止计算后,程序运行结果中显示每个预想事故计算所用的时步,由故障消失后开始计。

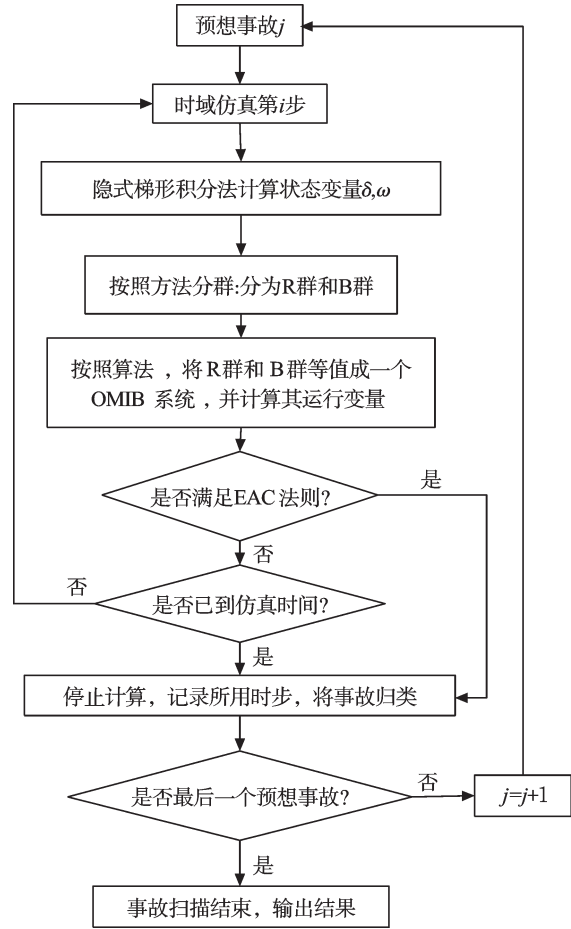


图1 基于SIME辨识方法流程图

2.1 程序实现说明

为说明EAC判据在程序中的实现过程,本研究以IEEE10机39节点新英格兰系统为例(参数如表1所示),在支路11的I侧设置了一个三相短路故障,故障切除时间为0.12 s,运行程序,记录仿真过程中发电机

表1 预想事故设置

支路编号	I侧节点	J侧节点	持续时间	地点
11	BUS-7	BUS-6	0.12 s	0%

的分群情况,如表2所示,仿真结束后作出10台发电机功角曲线,如图2所示。

表2 基于EAC判据的程序运行记录

积分步	是否满足EAC	OMIB1		OMIB2	
		R群	B群	R群	B群
1		9,0	余下编号		
10				4,3	余下编号
21	OMIB2满足				

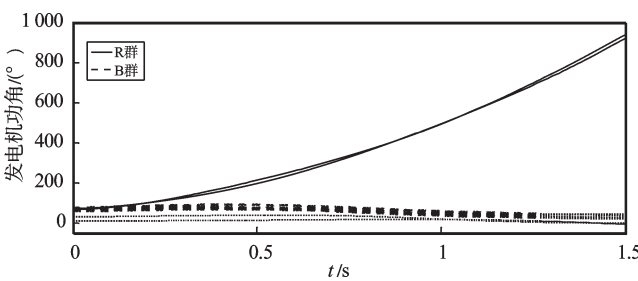


图2 发电机分群情况

根据表2可知,在计算过程中产生了两个候选OMIB系统。在故障消失后第1个积分步,产生OMIB1系统,在故障消失后第10个积分步,产生OMIB2系统,在第21个积分步,OMIB2系统满足EAC判据,停止本次计算。结合图2显示的发电机的分群情况,发电机最终分为两群,其中临界机群R群包含两台发电机,这与表2描述的发电机分群情况吻合。同时若用角度准则判断,根据程序运行情况,到第46个积分步才能判断系统失稳,而如果用EAC判据,在故障消失后第21个积分步就能判断出系统是否稳定。

2.2 系统仿真实例一

针对IEEE10机39节点新英格兰系统,以线路首端发生三相短路故障为例,本研究设置34个预想事故,故障切除时间为0.12 s,分别应用角度判别准则和EAC判据进行事故扫描计算,记录不同判据下筛选出的有害预想事故编号和所用的积分时步,采用两种运行方式。

运行方式1:EAC判据下事故扫描用时0.013 741 01 s,角度判别准则下用时0.024 632 21 s。两种判据下,从34个预想事故中筛选出的有害预想事故编号以及所用的时域仿真步数如表3所示。

表3 运行方式1下结果

有害预想事故编号	所用时域仿真积分步数	
	EAC判据	角度准则
13	18	35
22	36	61
30	23	46

运行方式2:EAC判据下,事故扫描计算用时0.014 767 60 s,角度准则判据下用时0.025 311 29 s。

两种判据下,从34个预想事故中筛选出的有害预想事故编号以及所用的时域仿真步数如表4所示。

表4 运行方式4下结果

有害预想事故编号	所用时域仿真积分步数	
	EAC判据	角度准则
0	25	35
1	2	61
13	25	46
14	57	---
21	48	65
26	71	91
32	45	68
33	27	45

以下本研究对上述两种运行方式下得到的结果进行总结和说明。两种运行方式下,应用EAC判据的事故扫描计算所用时间远少于角度法准则下的计算时间,证明了EAC判据能够提高快速事故扫描速度。表4中,故障14下,以角度准则为判据,判定系统是稳定的,而由EAC判据判定系统是失稳的,这种情况将在2.3节进行说明。比较表3和表4,若不计表4中的故障14,EAC判据筛选出的有害事故集和基于角度准则筛选法得到的有害事故集一致,这说明EAC判据的准确性。同时观察表3和表4,在当前预想故障下,EAC判据下,暂态稳定计算需要的积分步数远远少于角度准则,这说明了该判据的快速性。

2.3 系统仿真实例二

该国内实际系统有发电机30台,194条支路。本研究以线路首端发生三相短路故障为例,设置预想事故194个,故障持续时间0.1 s,应用角度判别准则和EAC判据进行事故扫描计算,计算结果如表5所示。

表5 国内某系统仿真结果

有害预想事故编号	所用时域仿真积分步数	
	EAC判据	角度准则
30	12	53
60	13	52
61	13	51
85	---	30
90	34	92
91	17	62
126	7	54
130	11	57
169	13	65
182	16	61

表5中,预想事故编号85下,用角度准则判断,系统是失稳的,而用EAC判据判断,系统是稳定的,2.4

节会对这种情况的出现作解释。比较两者计算时间,EAC判据计算用时8.682 267 34 s,而角度准则用时25.949 743 91 s,结合表5中数据,在相同预想事故下,应用EAC判据暂态稳定计算所用的积分步数远少于角度准则法下的计算,再次证明了应用EAC判据的快速性。同时除去编号为85的预想事故,应用EAC判据的快速事故扫描的有害事故集和基于角度准则得到的有害事故集一致,也再次说明了EAC判据的准确性。

2.4 EAC判据的特点

在一些情况下,因不加调速器和励磁器的作用,仿真时间设为1.5 s。在1.5 s左右,用角度判别准则,即以最大功角差是否超过 180° 作为系统是否暂态稳定的判据,可能会发生漏判,但若采用EAC判据,由于其所需的积分步数远少于角度法准则,就能防止这种情况。以下本研究对2.2节中10机39节点系统仿真出现的特殊情况作具体分析。故障设置如表6所示,支路14的I侧发生了三相短路故障,故障切除时间为0.12 s。

表6 预想事故设置

支路编号	I侧节点	J侧节点	持续时间/s	地点
14	BUS-9	BUS-8	0.12	0%

两种判据比较如图3所示,本研究以最大摇摆角超过 180° 作为判断系统失稳依据,则在时域仿真时间1.5 s处,判断系统稳定,但若仿真时间稍微延长,发现系统其实是失稳的,在这种情况下,采用角度判别准则时发生了漏判。但是如果用本研究的判据来判断,在时域仿真时间0.7 s处就能判断该系统失稳。该情况表明,采用EAC判据能有效地防止漏判情况的发生。

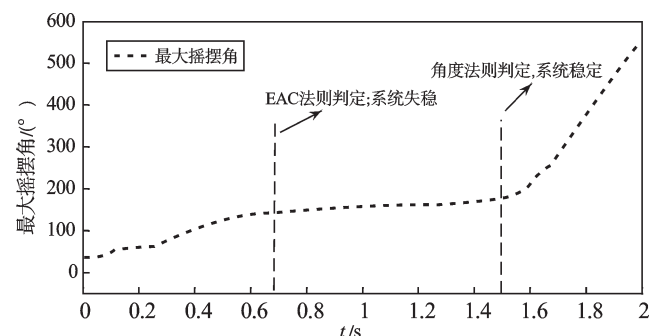


图3 两种判据比较

在不断调试过程中,本研究发现角度判别准则下的事故扫描计算中,还存在误判的情况,即可能将最大摇摆角超过 180° 后又返回的情况定为系统失稳。如2.3节国内某系统的事故扫描计算中出现的情况。故障设置如表7所示,支路85的I侧发生了三相短路故障,故障切除时间0.1 s。

表7 预想事故设置

支路编号	I侧节点	J侧节点	持续时间/s	地点
85	JiuLi2	GongZuiX2	0.1	0%

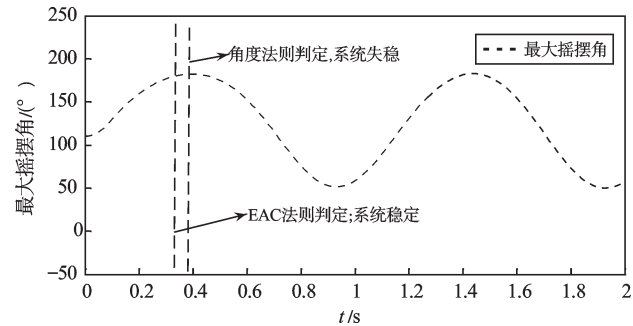


图4 最大功角差法则误判情况

观察图4,在0.4 s左右,发电机功角超过了 180° ,角度判别准则下系统被判定为失稳,而事实上,发电机最大摇摆角在0.4 s左右超过 180° 后又返回,并在其后时间内作周期性摇摆,在这种情况下,如果用EAC判据判定,在故障切除后0.3 s左右后就能判断系统是稳定的,防止了误判情况的发生。

综上所述,应用EAC判据的事故扫描器,在基于时域仿真的基础上,除了准确性高、适应能力强以及速度快的特点外,还能克服角度准则判据可能存在的误判和漏判现象,同时能大大提高运算速度。

3 结束语

针对基于时域仿真计算,如果采用角度法,进行电力系统暂态稳定性判断时仿真时间很长;如果采用基于SIME辨识,将电力系统等值成一个OMIB系统,在每个积分步更新数据,并用EAC法则判断系统的稳定性,则所需的仿真时间大大缩短。本研究将EAC判据和角度法准则分别应用于基于时域仿真的快速事故扫描器中,以新英格兰10机39节点系统和国内某电网系统为例进行计算,结果也充分证明了EAC判据的优越性,并且能够防止采用角度准则判据时产生的漏判和误判。基于以上优点,本研究提出的EAC判据可应用于基于时域仿真的快速事故筛选算法中,提高计算速度。

参考文献(References):

[1] 王守相,张建军. 基于统计学习的模糊暂态稳定事故的筛选与排序[J]. 电工技术学报,2006,21(3):113-117.

[2] 吕志来,张宝会,哈恒旭. 模糊子集和Taylor级数相结合的快速事故筛选方法[J]. 电力系统自动化,2000,22(4):17-20.

[3] 王守相,张伯明,刘映尚. 事故临界切除时区计算及其在事故扫描中的应用[J]. 电网技术,2003,27(10):72-77.

[4] 吕志来,张保会,哈恒旭. 基于改进的势能界面判据实时预测电力系统稳定性[J]. 中国电机工程学报,2002,22(4):94-99.

[5] 付书逊. 势能界面法(PEBS)暂态稳定分析的综述及展望[J]. 电力系统自动化,1998,22(9):16-18.

[6] 王宗义,郭志忠. 基于PEBS法的暂态能量裕度灵敏度快速计算[J]. 继电器,2006,34(2):24-28,74.

[7] 王天施,苑 舜. 一种在线动态安全分析事故扫描的综合法[J]. 电力系统保护与控制,2009,21(37):12-14.

[8] 王守相,张伯明,郭 琦. 在线动态安全评估中事故扫描的综合性能指标法[J]. 电网技术,2005,29(1):60-64.

[9] BOSE F C, A Contingency ranking based on Severity indices dynamic security analysis[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1999, 14(3):980-985.

[10] BRAND W V, KUMAR A B R, IPAKCHI A, et al. Severity indices for contingency screening in dynamic security assessment [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1997, 12(3):1136-11427.

[11] 甘德强,王锡凡,杜正春,等. 暂态稳定性分析的自动事故选择方法[J]. 电力系统自动化,1994,18(1):25-30.

[12] ZHANG Y, WEHENKEL L, ROUSSEAUX P, et al. SIME: A hybrid approach to fast transient stability assessment and contingency selection [J]. **Journal of Electrical Power and Energy Systems**, 1997, 19(3):195-208.

[13] ZHANG Y, WEHENKEL L, PAVELLA M. SIME: A comprehensive approach to fast transient stability assessment [J]. **Transactions of IEE of Japan**, 1998, 118-B(2):127-132.

[14] PAVELLA M. Generalized one-machine equivalents in transient stability studies [J]. **IEEE Power Engineering Review**, 1998, 18(1):50-52.

[编辑:李 辉]