

基于 WAMS 预测轨迹的 IEEAC 等值

徐英¹, 夏世威¹, 毛安家², 郭志忠¹

(1. 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 基于全系统的 WAMS 的实时测量数据和网络模型对发电机的暂态稳定轨迹进行准确预测, 代替常规的时域仿真法, 再对 WAMS 的轨迹预测结果采用 PCOI 映射: $R^n \rightarrow E(R^1)$, 进行 IEEAC 法等值。算例测试表明, 将 WAMS 轨迹预测运用在 IEEAC 分析上, 在保证预测轨迹准确的同时, 可以正确地判断暂态稳定性, 提高了 IEEAC 的计算效率。

关键词: WAMS; 暂稳分析; 轨迹预测; PCOI 映射; IEEAC

IEEAC method based on the WAMS predicting trajectory

XU Ying¹, XIA Shi-wei¹, MAO An-jia², GUO Zhi-zhong¹

(1. Dept of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Based on the WAMS accurate and dense real-time data and network models of generators, this paper proposes a fast transient stability predicting method for transient stability track, instead of the conventional time-domain simulation method. And then it maps the WAMS predicting results by PCOI methods to remain the characteristic of analyzing complex model and multiple-stability. The testing results show that the use of the WAMS forecast trajectory in IEEAC analysis can ensure the accuracy of the track, analyze the transient stability, and increase the computing efficiency as well.

Key words: WAMS; transient stability analysis; predicting trajectory; PCOI; IEEAC

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)04-0031-04

0 引言

EEAC 法是一种比较成熟的直接法, 其发展经历了三个阶段: SEEAC、DEEAC、IEEAC。SEEAC 采用模型聚合技术将多机系统聚合到 OMIB 系统, 并忽略互补群内的非同调性, 实现了暂态稳定的定量分析, 可以快速求取 CCT^[1]。但由于 SEEAC 对模型做了大量的简化, 因而其精度受到制约。DEEAC 放松了群内同调的假设, 采用大步长轨迹聚合技术, 但在精度上还是有较大的损失, 而且方法的模型适应性还是很差, 因此 DEEAC 的发展也受到了限制。最终形成的 IEEAC 法, 不再回避积分, 采用 SBS 法求取各发电机动态轨迹, 实现了积分空间和观察空间的分离。IEEAC 法的模型适应性和精度都与所采用的数值积分法相同, 在整个动态过程中采用小步长积分, 轨迹聚合技术, 可以有效地处理多摆稳定问题^[2]。由于 IEEAC 法实质是基于时域仿真法给出稳定指标, 因此计算量较大。

同时 WAMS 由于能够实现在毫秒数量级上对

电力系统运行状态进行精确同步测量, 为表现电力系统真实状态提供了必要的技术条件, 也为开发新的暂态稳定方法提供了新技术支持。而在计算算法上, 高阶泰勒级数法以其简洁的表达方式, 方便的实现方法和高效的计算性能, 赢得众多电力工作者的关注^[3-5]。文献[6]正是受到了 Taylor 级数法的启示, 提出了一种基于广域测量过程量测数据的快速暂态稳定预估方法。本文正是在该文的基础上, 依靠 WAMS 过程量测数据的高密度特性, 应用三次样条差值预估五阶模型的发电机转角轨迹的方法。同时打破了以往常规的基于时域仿真的 IEEAC 等值, 创新地将 WAMS 预测的轨迹结果采用 PCOI 映射, 得到基于 WAMS 的 IEEAC 方法。

1 WAMS 轨迹预测

发电机转子运动方程为:

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= \frac{1}{T_j} (P_m - P_e - D\omega_0 (\omega - 1)) \\ \dot{\delta} &= (\omega - 1)\omega_0 \end{aligned} \quad (1)$$

有了 WAMS 的支持, 发电机的转角 δ , 角速度 ω 可以高密度精确测量, 发电机的电磁功率 P_e 也可以通过测量到的电压和电流直接算出。根据发电机转子运动方程 (1) 可知, 如果忽略原动机调速系统的作用, 则在运行过程中, 除 δ 和 ω 外, δ 的一阶和二阶导数, ω 的一阶导数均可以通过测量或简单计算直接获得。如果此时能够获得它们的更高阶导数, 则可以根据泰勒级数展开式来预测未来时刻的 δ 和 ω 值。由于发电机转角和角速度曲线具有良好的光滑性, 加上 WAMS 数据采样密度较高, 因此可以尝试通过数值处理的方法, 直接利用 δ 、 ω 以及 P_e 的过程量测数据来快速获取 δ 和 ω 的高阶导数。

下面以发电机五阶实用模型为例, 推导该模型下的基于 WAMS 过程测量数据的暂态稳定预估方法。发电机五阶实用模型可以用如下公式表示^[7]:

$$\begin{cases} V_d = E_d'' + X_q'' I_q - R_a I_d \\ V_q = E_q'' - X_d'' I_d - R_a I_q \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_{d0}' \dot{E}_q' = E_f - (E_q' - X_{dr}' E_q' + X_{dr}' E_q'') \\ T_{d0}'' \dot{E}_q'' = X_{da}' T_{d0}' \dot{E}_q' - E_q'' + E_q' - (X_d' - X_d'') I_d \\ T_{q0}'' \dot{E}_d'' = -E_d'' + (X_q - X_q'') I_q \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} T_j \dot{\omega} = P_m - (E_q'' I_q + E_d'' I_d - (X_d'' - X_q'') I_d I_q) \\ D \omega_0 (\omega - 1) \\ \dot{\delta} = \omega_0 (\omega - 1) \end{cases} \quad (4)$$

在 WAMS 技术支持下, PMU 可以测定定子端电压, 定子电流的瞬时值 u_{abc} , i_{abc} , 即对于如下电压电流瞬时值表达式, PMU 能够同时测定 U_{abc} , I_{abc} , ω , θ_{abc} , φ_{abc} 。

$$\begin{cases} u_{abc} = \sqrt{2} U_{abc} \sin(\omega t + \theta_{abc}) \\ i_{abc} = \sqrt{2} I_{abc} \sin(\omega t + \varphi_{abc}) \end{cases} \quad (5)$$

通过 Park 变换:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_a & \cos \theta_b & \cos \theta_c \\ -\sin \theta_a & -\sin \theta_b & -\sin \theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \varphi_a & \cos \varphi_b & \cos \varphi_c \\ -\sin \varphi_a & -\sin \varphi_b & -\sin \varphi_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

可以方便地求出发电机定子 d, q 轴电压和电流, 因此, 可以认为, PMU 能够测定 V_q , V_d , I_q , I_d , 同时, 由于定子 a, b, c 三相端电压和电流均被测

出, 所以, 可以认为发电机电磁功率也可以被 PMU 测出。结合式 (2) ~ (4) 可知: 对于 t_k 时刻之前的 N 个时刻, 可以认为 $\delta_{t_{k-N}}, \dots, \delta_{t_{k-2}}, \delta_{t_{k-1}}, \omega_{t_{k-N}}, \dots, \omega_{t_{k-2}}, \omega_{t_{k-1}}$ 以及 $P_{et_{k-N}}, \dots, P_{et_{k-2}}, P_{et_{k-1}}, E_{dq_{t_{k-N}}}''', \dots, E_{dq_{t_{k-2}}}''', E_{dq_{t_{k-1}}}''', E_{qt_{k-N}}''', \dots, E_{qt_{k-2}}''', E_{qt_{k-1}}''', E_{qt_{k-N}}', \dots, E_{qt_{k-2}}', E_{qt_{k-1}}'$ 以及它们的一阶导数, 均已经通过 WAMS 精确测得 (或者经过简单计算即可求得)。

由于样条函数具有良好的光滑性, 考虑到计算开销和样条函数的一些性质, 本文推荐使用三次 (最高为四次) 样条函数, 高次样条插值虽然能拟合插值点上的高次导数, 但在非插值点上有可能出现畸变, 并且会加大计算开销, 反而不可取。假设在 t_k 时刻开始预测系统未来的运行轨迹, t_k 时刻前 N 个时刻的 ω_i , δ_i , P_{ei} 已经通过测量或简单计算获得, 综合考虑样条插值的需要以及计算精度和时间消耗, 本文推荐 $N=10$, 利用 WAMS 过程量测数据进行暂态稳定预估, 采样时间间隔为 50 ms。

在这些点上, 分别对 δ , ω , E_d'' , E_q'' , E_q' 以及它们的一阶导数进行 3 次样条插值以求得它们在 t_k 时刻的二阶乃至更高阶导数, 从而利用泰勒级数展开式求得它们在 t_{k+1} 时刻值。在得到 t_{k+1} 时刻 δ 值后, 可以通过联立定子电压方程和网络方程来求取 V_q , V_d , I_q , I_d , P_e 值。然后重复以上过程, 即可以对发电机转子运动情况进行快速在线预估。这里的网络方程为:

$$(\mathbf{Y} + \mathbf{Y}_0) \mathbf{V} = \mathbf{I}' \quad (8)$$

其中: \mathbf{V} 、 \mathbf{I}' 分别为节点电压向量和发电机定子 Norton 电流; \mathbf{Y} 、 \mathbf{Y}_0 分别为系统导纳阵形成的分块矩阵和发电机相关的分块对角矩阵。

$$V_i = \begin{bmatrix} V_{ix} \\ V_{iy} \end{bmatrix}, Y_{ij} = \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix}, Y_{0i} = \begin{bmatrix} G_x & B_x \\ B_y & G_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{cases} E_x'' = E_d'' \sin \delta + E_q'' \cos \delta \\ E_y'' = -E_d'' \cos \delta + E_q'' \sin \delta \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} I_x' \\ I_y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x & B_x \\ B_y & G_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x'' \\ E_y'' \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$I_i = \begin{bmatrix} I_{xi} \\ I_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xi}' \\ I_{yi}' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_{xi} & B_{xi} \\ B_{yi} & G_{yi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{xi} \\ V_{yi} \end{bmatrix} \quad (12)$$

发电机电磁功率为:

$$P_e = V_x I_x + V_y I_y \quad (13)$$

2 IEEAC 法等值

IEEAC 算法主要是利用 PCOI 映射保持系统稳定充分条件的 EEAC 法^[8], 关键是将观察空间和积分空间分开, 在 R^n 空间中对任何复杂的多机模型积分, 将数值解中的多机转角轨迹用参量形式映射到一系列低维观察空间中, 就可以根据低维的映像轨迹来判断 R^n 空间问题的稳定性。经过变换后的 OMIB 系统如下:

$$M_g \ddot{\delta}_g = M_T^{-1}(M_{Ag} f_{Sg} - M_{Sg} f_{Ag}) = P_{mg} - P_{eg} \quad (14)$$

其中

$$M_g = M_T^{-1} M_{Sg} M_{Ag}, \quad M_T = \sum_{k=1}^n M_k$$

$$P_{mg} = M_T^{-1}(M_{Ag} P_{mSg} - M_{Sg} P_{mAg})$$

$$P_{mc} = M_T^{-1}(M_{Ag} P_{cSg} - M_{Sg} P_{cAg})$$

对 WAMS 的预测结果进行 PCOI 映射, 得到观察空间里的映射轨迹, 就得到类似于基于时域仿真法的 IEEAC 等值结果。对 IEEAC 的等值结果, 可以给出稳定域度等定量指标, 这样即使任何一个参数有微小的变化, 也能看出该参数变化对稳定指标的影响大小。

3 算法的步骤

采用五阶实用模型下利用 WAMS 测量数据进行 IEEAC 的等值过程按照如下步骤:

1) 对数据 $\delta_{i_{k-N}}, \dots, \delta_{i_{k-2}}, \delta_{i_{k-1}}, \omega_{i_{k-N}}, \dots, \omega_{i_{k-2}}, \omega_{i_{k-1}}, E_{dt_{k-N}}'', \dots, E_{dt_{k-2}}'', E_{dt_{k-1}}'', E_{qt_{k-N}}'', \dots, E_{qt_{k-2}}'', E_{qt_{k-1}}'', E_{qt_{k-N}}', \dots, E_{qt_{k-2}}', E_{qt_{k-1}}'$, 进行样条插值, 求得其在这些点上的二阶、三阶导数。

2) 在其一阶导数上进行样条插值, 求得其在测量点上的三阶、四阶导数, 依此类推, 可以求得 $\delta_{i_k}, \omega_{i_k}, E_{dt_k}'', E_{qt_k}'', E_{qt_k}'$ 的高阶导数。但是, 由于受误差和计算量的影响, 一般只求取到 ω_{i_k} 的四阶导数。

3) 在求得 $\delta_{i_k}, \omega_{i_k}, E_{dt_k}'', E_{qt_k}'', E_{qt_k}'$ 的二、三、四阶导数后, 即可以利用 Taylor 级数求得 t_{k+1} 时刻的 $\delta_{i_{k+1}}, \omega_{i_{k+1}}$ 。类似地, 还可以求得 t_{k+1} 时刻的 $E_{dt_{k+1}}'', E_{qt_{k+1}}'', E_{qt_{k+1}}'$ 。

4) 利用式 (8) ~ (13) 求得 t_{k+1} 时刻的电磁功率 $P_{el_{k+1}}$, 由式 (1) 知 t_{k+1} 时刻的 $\delta_{i_{k+1}}', \delta_{i_{k+1}}'', \omega_{i_{k+1}}'$, 利用式 (2)、式 (3) 求 t_{k+1} 时刻 $E_{dt_{k+1}}'', \dots, E_{qt_{k+1}}'', E_{qt_{k+1}}'$

的一阶导数。

5) 重复 1) ~ 4) 直到 $t_k = t_{sm}$ 。

6) 应用式 (14) IEEAC 等值, 对轨迹预测结果进行 PCOI 映射, 得 IEEAC 等值结果。

4 算例分析

4.1 WAMS 轨迹预测

算例采用 New England 10 机 39 节点系统。这里给出了 16-15 线路 16 节点 0 s 三相短路, 在 0.25 s 切除该线路后, 利用 Taylor 级数法, 三次样条预测法及实际测量得到的 1 号机、5 号机、10 号机转角轨迹, 如图 1。可见, 三次样条插值预测的结果和实际测量、经典 Taylor 级数法得到的结果基本一致, 轨迹误差在可接受的范围之内。限于篇幅, 本文仅给出了 10 机 39 节点系统, 其他系统算例请参见文献 [6]。

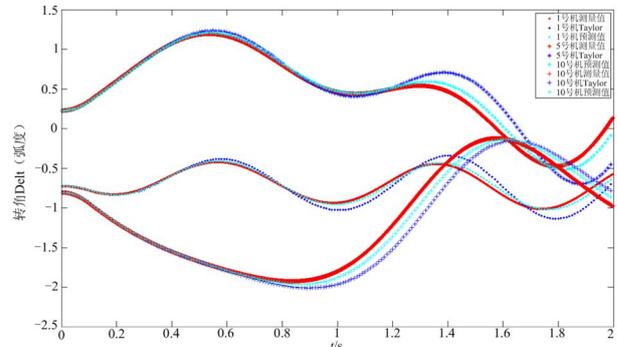


图 1 16*-15 三相短路故障转角曲线

Fig.1 16*-15 three-phase short-circuit fault angle-curve

表 1 是几种算法的计算时间的比较, 结果表明计算速度可以达到常规高阶 Taylor 级数法的 10 倍左右, 计算效率很高。

表 1 几种算法的耗时对比

Tab.1 Time consume comparison of the algorithms (ms)

算法	10G-39B
R-K 法 (步长 0.001 s)	5 206
10 阶 Taylor 法 (步长 0.02 s)	390
本文方法	21

4.2 IEEAC 等值暂稳分析

IEEE10 机 39 节点系统, 16-15 支路 16 节点 0 s 三相短路, 在不同时间切除故障线路, WAMS 轨迹预测后应用 IEEAC 等值后的轨迹如图 2、3。

从图 2 可以看出, 在 170 ms 切除故障时, 电磁功率角曲线保持在正弦曲线的上升段, 系统是稳定的, 转角随时间变化趋向稳定值。而图 3 反映出电磁功率角曲线是有着上升段和下降段的完整的类正

弦曲线, 是不稳定的, 而功角也随着时间在一直增大。

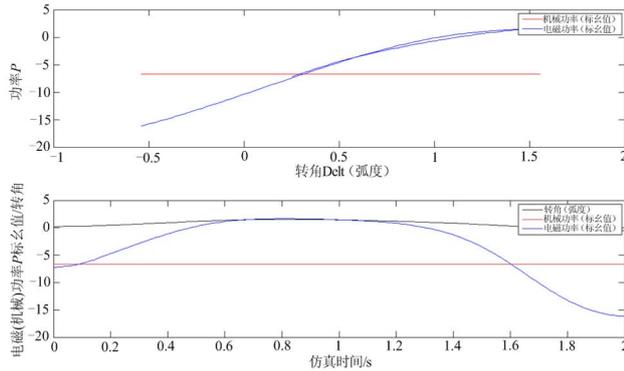


图2 IEEAC 等值结果 (170 ms 切除故障)

Fig.2 IEEAC equivalent results (clear failure at 170 ms)

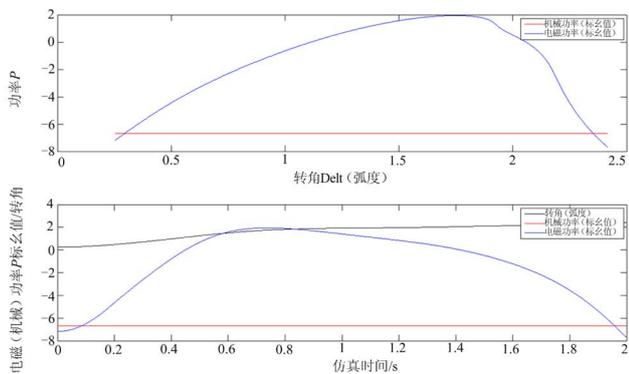


图3 IEEAC 等值结果 (180 ms 切除故障)

Fig.3 IEEAC equivalent results (clear failure at 180 ms)

从图 2、3 还可以看出基于 WAMS 预测轨迹得到的 IEEAC 临界切除时间结果为 0.17 s 左右, 而采用时域仿真法得到的 16*-15 线路 16 节点三相短路时的临界切除时间为 0.17 s。因此基于 WAMS 的预测 IEEAC 结果能比较好地求取 CCT 和反映系统稳定性。

5 结论

利用WAMS数据的高密度特点对发电机转角轨迹预测, 极大地提高了计算效率, 而预测的轨迹与时域仿真结果非常接近。将该预测方法应用于 IEEAC, 得到正确的 IEEAC 分析暂稳分析结果, 有效地提高 IEEAC 的计算效率, 在丰富 IEEAC 理论上做了大胆的尝试。

参考文献

[1] 薛禹胜. DEEAC 的理论证明-四论暂态能量函数直接法[J]. 电力系统自动化, 1993, 17(7): 8-20.
XUE Yu-sheng. A Theoretical Proof of DEEAC[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(7): 8-20.

[2] 薛禹胜. EEAC 与直接法的机理比较-定性判稳与定量分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 1-5, 25.
XUE Yu-sheng. A Critical Comparison of Various Methods for Transient Stability Assessment Qualitative Criterion and Quantitative Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(13): 1-5, 25.

[3] 徐英, 白雪峰, 郭志忠. 采用动态多维阶数控制的暂态稳定计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 81-85.
XU Ying, BAI Xue-feng, GUO Zhi-zhong. Transient Stability Calculation Method Using Dynamic Multi-dimension Order Control[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 81-85.

[4] 郭志忠, 柳焯. 快速高阶 Taylor 级数法暂态稳定计算[J]. 中国电机工程学报, 1991, 19(3): 7-15.
GUO Zhi-zhong, LIU Zhuo. Fast Transient Stability Simulation by Higher Order Taylor Series Expansions[J]. Proceedings of the CSEE, 1991, 19(3): 7-15.

[5] 杜正春, 甘德强, 刘玉田, 等. 电力系统在线动态安全评价的一种数值积分方法[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(1): 29-32.
DU Zheng-chun, GAN De-qiang, LIU Yu-tian, et al. A Fast Numerical Integration Method for Power System On-line Dynamic Security[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(1): 29-32.

[6] 毛安家, 郭志忠, 张学松. 一种基于 WAMS 过程量测数据的快速暂态稳定预估方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 40-45.
MAO An-jia, GUO Zhi-zhong, ZHANG Xue-song. A Fast Transient Stability Predicting Method Based on the WAMS Process Measurement Data[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 40-45.

[7] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Dynamic Power System Theory and Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[8] 薛峰, 薛禹胜. 计及双轴发电机模型的 IEEAC 法[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(11): 13-18, 37.
XUE Feng, XUE Yu-sheng. IEEAC Method with Two Axis Generator Models[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(11): 13-18, 37.

收稿日期: 2009-02-21; 修回日期: 2009-11-05

作者简介:

徐英 (1980-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: dahei_xu@163.com

夏世威 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。