

低频振荡预警及分析功能在新疆电网 WAMS 系统中的应用及改进

张彦军¹, 张娟¹, 常喜强¹, 刘冉¹, 姚秀萍¹, 乔怡²

(1 新疆电力公司电力调度中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 对新疆电网广域测量系统高层应用中的低频振荡预警和分析功能进行了深入研究及改进。针对系统中原有的 Prony 算法分析长数据段时无法辨识出衰减快的分量而导致误差偏大的不足及视窗短的问题, 引入时域峰值识别法, 将两者有效的结合起来, 进行长短视窗分析, 有效提高了分析长数据段的准确性。同时建立了两段数据层分析方法及不同系统的数据转化分析方法, 将同系统的数据分段、分层进行分析, 将不同系统采集到的数据进行对比分析相互验证。通过实例验证了算法的可行性和有效性, 对电网运行起到了实际作用, 有利于新疆电网低频振荡分析和实时告警, 保证了电网的安全稳定运行。

关键词: 低频振荡; WAMS 系统; Prony 算法; 时域峰值识别法

Abstract: The early-warming and analysis function module of low frequency oscillation based on WAMS are studied thoroughly. Because the signal components with high attenuating speed can hardly be identified, the analysis for long data segment using Prony algorithm causes a big error. And the length of visual window of Prony algorithm is also short. Considering the above mentioned shortcomings of Prony algorithm, a algorithm called time-domain peak value is introduced which effectively improves the accuracy of analysis for long data segment. At the same time, two-stage data analysis method and analysis method based on data gathered from different system are established. The practical example result shows the feasibility and efficiency of the new method. Improved analysis function module plays an important role in operation, which ensures the safety and stability of Xinjiang power grid.

Key words: low frequency oscillation; WAMS system; Prony algorithm; time-domain peak values

中图分类号: TM712 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0036-05

0 引言

电力系统中发电机经输电线并列运行时, 在扰动下会发生发电机转子间的相对摇摆, 并在缺乏阻尼时引起持续振荡。此时, 输电线上功率也会发生相应振荡, 由于振动频率一般较低, 为 0.2~2.5 Hz 故称为低频振荡^[1]。系统互联规模的扩大和现代大型发电机组的快速励磁调节器的使用, 使得低频振荡问题在现代电力系统中日益突出。

2007 年, 新疆电网实现了全疆联网。电网覆盖面积广, 电源与负荷中心距离远, 地区电网之间跨度大并且与主网连系薄弱。运行方式多变, 长链型大跨度松散的电网结构, 造成电网整体阻尼较弱, 抗扰动能力差。电网动态稳定性较低。系统低频振荡问题已经成为严重威胁新疆电网安全稳定的问题之一。

随着基于向量测量单元 (PMU) 的广域测量系统 (WAMS) 在新疆电网中全面应用, 大大提高了对新疆电网低频振荡问题的分析能力。新疆电网 WAMS 系统中的低频振荡预警及分析功能模块集成了多种经典的低频振荡分析算法。在深入研究原有算法的基础上, 针对 Prony 算法在分析时间长度较长的数据段时由于无法识别衰减快的分量而造成的误差偏大的问题, 研究并开发了新的算法——时域峰值识别法, 有效地提高了分析长数据段的准确性。另外, 还基于不同系统采集的数据, 开发了 WAMS 系统中低频振荡的分析功能, 它能将不同系统采集的数据进行验证分析, 并能相互校验分析结果, 从而保证了分析算法的有效性、可靠性、适应性和实用性。改进后的低频振荡预警及分析功能模块更有利于新疆电网低频振荡分析和实时告警, 为电网的安全稳定运行保驾护航。

1 新疆电网 WAMS 系统中低频振荡预警及分析功能模块中所采用的算法简介

低频振荡分析所采用的工具 Ringdown 是一个基于 MATLAB 的图形化用户交互界面,用于系统中基于动态记录的模型分析。Ringdown 中集成的低频振荡分析算法可以从系统的动态响应中估计模型成分(包括频率、阻尼等),并且根据系统的阻尼特性预计其稳定趋势。

目前低频振荡的分析方法有傅立叶变换、小波分析和 Prony 分析。傅立叶变换和小波分析需要进行大量的数值计算,难以满足在线辨识低频振荡对实时性的要求。不仅如此,这两种分析方法无法提取出信号的衰减系数,也就难以估计系统的阻尼变化趋势。Prony 分析方法能估算信号的频率、衰减因子、幅值和初相,利用 Prony 分析方法能直接提取出振荡信号的各种特征,为振荡模式的确定和阻尼分析提供基础,但是 Prony 分析方法对输入信号的要求高。在新疆电网 WAMS 系统中,综合考虑了各种算法的优缺点,开发了新疆电网 WAMS 系统低频振荡算法,快速给出低频振荡告警信息,使运行人员能够及时了解系统状况,并采取合适的措施。

1.1 低频振荡实时监测算法

算法采用线路的有功功率数据进行低频振荡运算,每隔 50 ms 从 PI 数据库取出一次数据进行运算,报警结果显示在工作站上。该低频振荡算法不需要太多的参数,而且大部分参数采用内定值,不需要现场进行整定,具有原理简单、计算快速、实时性强等特点,而且算法还具有广泛的通用性,可以通过调整参数来设置其动作的灵敏性。

1.2 Prony 分析方法

Prony 方法采用一组 P 个具有任意幅值、相位、频率与衰减因子的指数函数的线性组合来拟合等间距的采样数据,其离散时间的函数形式为

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^P b_i z_i^n, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

并使用 $\hat{x}(n)$ 作为 $x(n)$ 的近似。式 (1) 中, b_i 和 z_i 假定为复数,即:

$$b_i = A_i \exp(j\theta_i) \quad (2)$$

$$z_i = \exp[(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t] \quad (3)$$

式中, A_i 为幅值; θ_i 为相位(单位:弧度); α_i 为衰减因

子; f_i 表示振荡频率; Δt 代表采样间隔。为方便计算,此后令 $\Delta t=1$ 。

构造代价函数

$$\epsilon = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n) - \hat{x}(n)|^2 \quad (4)$$

若使误差平方和为最小,则可求出参数四元组 ($A_i, \theta_i, \pi_i, f_i$)。通过参数四元组,可以推导得出各模式对应的其他参数,如周期、相对能量等。

由于 Prony 分析对输入信号要求高及对噪声敏感等特点,为确保分析结果的正确和计算精度在应用中一般需要满足以下几点要求。

1) Prony 分析要用等间隔的采样数据,由于 PI 数据库中的数据是采用压缩后存入的,一般数据间隔都不相同,因此从 PI 数据库取数时一定要取拟合后的等间隔数据,不要取原始数据。

2) 信号的选择:选择电压幅值、有功功率、频率、频率变换率,尽量不要选取一些变化不规则或谐波含量较大的信号。

3) 非线性的影响:由于 Prony 是用一组指数函数的线性组合来拟合采样数据,因此要分析的数据不要包含非线性部分,包括电压消顶、有功功率超过稳定极限的情况等。

4) 至少要选择 2 个完整周期的数据长度进行分析,一般要求数据长度在 10~20 s 之间。

5) 噪声对 Prony 分析的结果影响很大,当噪声较大时请适当减少要分析数据的长度以提高信噪比,并使用平滑滤波功能。

6) 由于故障时刻包含了大量的谐波成分,因此分析的数据要选择故障前或故障后的数据进行分析,不要包含故障时刻。

7) 主导模式对振荡的影响最大,请使用相对能量方式来判别主导模式。

1.3 时域峰值识别法

由于 Prony 分析至少要选择 2 个完整周期的数据长度,用等间隔的采样数据进行分析,故存在一定的局限性,因此寻找采用基于对单一频率成分的脉冲响应而采用的模态参数辨识方法——改进时域峰值法,对系统动态记录进行截取,通过求取最大正峰值序列 $X(n), n=1, 2, \dots, S$ 可以在保证计算精度的前提下实现对长数据段的分析,并且可以根据式 (5) 求取系统当前阻尼。

$$\zeta = \frac{\ln \frac{X(1)}{X(S)}}{2\pi(S-1) \sqrt{1 + \left[\frac{1}{2\pi(S-1)} \ln \frac{X(1)}{X(S)} \right]^2}} \quad (5)$$

式中, S 为最大正峰值序列的长度。

改进时域峰值识别法计算精度高,能高精度地识别频率、阻尼比、幅值,有效地克服了 Prony 算法对输入信号要求苛刻的缺陷。该算法是针对 WAMS 低频振荡预警及分析功能模块在实际应用中的不足新开发的分析方法,实现了对长数据段的分析,并且可以对系统的阻尼趋势进行分析。克服常规低频振荡算法的数据严格要求。

将上述低频振荡分析方法取长补短,与实际系统有机的结合起来,将更有利于工程实践应用,更方便有效地对低频振荡进行分析。该算法既能有效地利用严格推导的 Prony 分析方法,分析等间隔的采样数据(选择 2 个完整周期的数据长度,同时数据应具备一定的信噪比数值,不满足则不能进行分析),又能有效地克服上述分析条件的限制进行分析。

2 实例分析

实时录波数据是一个长过程数据,如果直接进行 Prony 分析,则出现需要截取波形,同时受信噪比的限制,信噪比太小也不能分析,波形截取不好也会得到不同的结果,容易得出片面阶段。通过改进和增加长过程数据分析方法,阻尼分析,得出系统此时状态的总体趋势、总体阻尼特性、总体评价。对于长数据分析之后,进而进行分解细化分析,如果长数据分析结论明确的情况下,则可以选择进入细化分析和不进入细化分析过程,但是对于长数据分析结论不明确,则必须进行细化分析,同时也可以简单判断出系统分出几个阶段,这样大大提高了分析精度和分析效率,对于单一变化的长过程数据可以明确结论,大大提高了动态实时监测判断的效率,缩短了判断时间,具有很强的实用性和实效性。对于多变化数据,则达到细化分析和初步预测的结果。同时此系统也可以选择其他数据格式的波形,如区域稳控系统录波数据、离线电力系统所需分析数据(包括 BPAPSASP 数据),实用性很强。下边的算例可以更直观地说明。

2.1 WAMS 系统数据分析

2007 年 8 月 10 日 13 时 21 分, WAMS 系统监测

到阿克苏变兹苏线有功功率发生波动,并发出告警。系统采集到的线路有功功率曲线及发出的告警信息提示如图 1 所示。

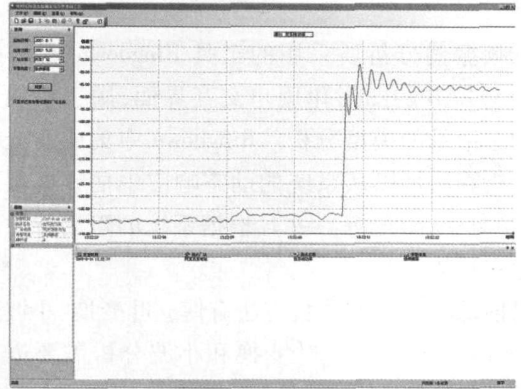


图 1 功率波动告警信息

图 1 中数据属于长过程,如果直接进行 Prony 分析,则出现需要截取波形,同时由于信噪比太小而不能分析,波形截取不好会得到不同的结果,因此先进行时域峰值识别法分析,通过峰值分析,得出阻尼特性,得出系统此时状态的总体衰减趋势。

长数据段阻尼特性分析如图 2 所示。

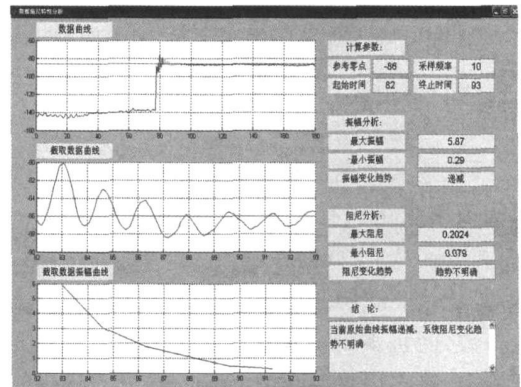


图 2 长数据段阻尼特性分析

由于得出的结论是变化复杂,需进行更进一步的细致分析。这时进入细致分析阶段:振荡阶段划分为起振阶段和平息阶段。

起振阶段分析结论如表 1 所示。

平息阶段分析结论如表 2 所示。

2.2 WAMS 系统中低频振荡预警及分析系统功能离线对比分析

利用新疆电网区域稳定控制系统采集的录波数据对 2.1 中的实例进行分析。稳控系统长数据段阻尼特性分析如图 3 所示。

振荡阶段划分为起振极端和平息阶段,起振阶段分析结论如表 3 所示。

表 1 起振阶段分析结论 (WAMS)

编号	振幅	频率 /Hz	衰减因子	相位 /度
1	5.024 78	1.041 04	-0.018 12	-16.224 10
2	6.654 83	0.000 00	—	180.000 00
3	0.000 28	0.000 00	—	0.000 00
4	3.041 15	2.053 29	0.130 78	-48.321 20
5	0.168 69	2.562 32	0.021 70	164.174 80
信噪比	57.390 986 dB			
是否产生低频振荡	是			
主导振荡	主导振荡是振幅为 5.024 778, 频率为 1.041 040 的振荡模式			
振荡类型	局部振荡			
起振原因	系统大扰动致使系统的特征根发生变化, 且产生附加的负阻尼, 抵消了系统中固有的正阻尼, 导致增幅振荡			

表 2 平息阶段分析结论 (WAMS)

编号	振幅	频率 /Hz	衰减因子	相位 /度
1	2.392 19	0.000 0	—	180.000 00
2	4.099 73	0.581 1	0.032 415	57.063 62
3	0.000 01	0.000 0	—	180.000 00
4	0.256 76	1.211 7	0.055 114	46.430 70
5	0.025 95	1.981 4	-0.034 755	136.051 00
信噪比	69.560 619 dB			
是否产生低频振荡	否			
主导振荡	主导振荡是振幅为 4.099 729, 频率为 0.581 133 的振荡模式			
振荡类型	全局振荡			
平息原因	系统阻尼恢复, 致使振荡衰减			

表 3 起振阶段分析结论 (稳控)

编号	振幅	频率 /Hz	衰减因子	相位 /度
1	4.859 3	0.204 383×5	-0.026 395	-33.416 80
2	0.797 5	0.000 000×5	—	0.000 00
3	4.621 6	0.475 208×5	0.140 936	-168.398 00
4	4.118 1	0.000 000×5	—	180.000 00
5	3.688 7	0.665 034×5	0.095 433	-119.180 00
信噪比	33.394 099 dB			
是否产生低频振荡	是			
主导振荡	主导振荡是振幅为 4.859 253 (WAMS系统数据计算结论为 5.024778), 频率为 1.021 915 (WAMS系统数据计算结论为 1.041 040) 的振荡模式			
振荡类型	局部振荡			
起振原因	系统大扰动致使系统的特征根发生变化, 且产生附加的负阻尼, 抵消了系统中固有的正阻尼, 导致增幅振荡			

注: 由于南部稳控本条数据的采样频率为分析软件默认采样频率的 5 倍, 所以分析结论中各模态振荡频率乘 5。

表 4 平息阶段分析结论 (稳控)

编号	振幅	频率 /Hz	衰减因子	相位 /度
1	11.395 0	0.119 2×5	0.156 95	-73.245 1
2	4.533 9	0.000 0×5	—	180.000 0
3	1.231 6	0.218 4×5	-0.009 98	-39.114 0
4	0.087 6	0.397 2×5	-0.018 40	-113.020 0
5	0.219 0	1.009 6×5	0.029 90	33.732 8
信噪比	40.909 172 dB			
是否产生低频振荡	否			
主导振荡	主导振荡是振幅为 11.395 140 (WAMS系统数据计算结论为 4.099 729), 频率为 0.595 81 (WAMS系统数据计算结论为 0.581 133) 的振荡模式			
振荡类型	全局振荡			
平息原因	系统阻尼恢复, 致使振荡衰减			

注: 由于南部稳控本条数据的采样频率为分析软件默认采样频率的 5 倍, 所以分析结论中各模态振荡频率乘 5。由于截取数据时间段不完全一致, 所以振幅区别大。

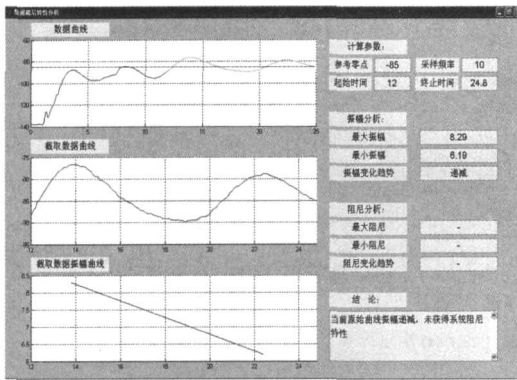


图 3 长数据段阻尼特性分析 (稳控)

注: 仅获得 2 个正向最大振幅值时, 无法获得阻尼特征。

平息阶段分析结论如表 4 所示。

2.3 电力系统综合程序计算数据离线对比分析

理论计算模拟故障数据结果, 对同一故障长数据段阻尼特性分析如图 4 所示。振荡阶段划分为起振极端和平息阶段。

起振阶段分析结论如表 5 所示。

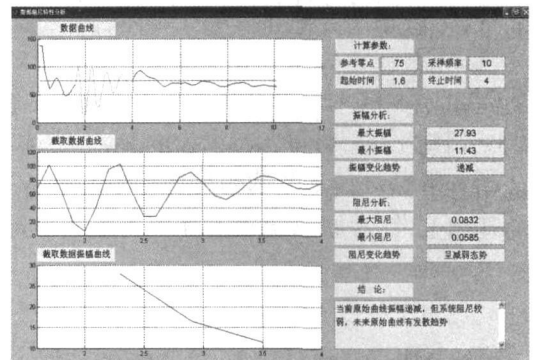


图 4 长数据段阻尼特性分析 (模拟故障)

表 5 起振阶段分析结论 (模拟故障)

编号	振幅	频率 /Hz	衰减因子	相位 /度
1	3.243 938	0.000 000	—	180.000 0
2	5.345 320	1.107 596	-0.192 107	-140.551 0
3	18.048 075	2.006 844	0.327 898	68.634 5
4	0.765 442	2.330 966	-0.138 104	-8.216 3
信噪比	56.234 284 dB			
是否产生低频振荡	是			
主导振荡	主导振荡是振幅为 5.345 320 (WAMS 系统数据计算结论为 5.024 778), 频率为 1.107 596 (WAMS 系统数据计算结论为 1.041 040) 的振荡模式			
振荡类型	局部振荡			
起振原因	系统大扰动致使系统的特征根发生变化, 且产生附加的负阻尼, 抵消了系统中固有的正阻尼, 导致增幅振荡			

平息阶段分析结论如表 6 所示。

表 6 平息阶段分析结论 (模拟故障)

编号	振幅	频率 /Hz	衰减因子	相位 /度
1	47.911 962	0.000 000	—	180.000 0
2	48.351 607	1.563 060	0.110 243	31.126 0
3	7.979 992	2.357 323	0.233 796	-57.971 0
4	2.295 392	0.000 000	—	0.000 0
信噪比	70.721 408 dB			
是否产生低频振荡	是			
主导振荡	主导振荡是振幅为 48.351 607 (WAMS 系统数据计算结论为 4.099 729), 频率为 1.563 060 (WAMS 系统数据计算结论为 0.581 133) 的振荡模式			
振荡类型	全局振荡			
平息原因	系统阻尼恢复, 致使振荡衰减			

注: 由试验仿真数据得到的主导振荡与从实采数据中得到的主导振荡相差较大。

比较三种数据的主导振荡识别结果可以得到以下结论: 三种数据波形起振速度快, 平息速度慢, WAMS 系统采集数据和南部稳控采集数据的分析结果几乎相同。实采数据识别的主导振荡和试验仿真识别的主导振荡之间的误差是由于时间段取的不同而造成。

3 结 论

在深入研究新疆电网低频振荡预警和分析功能模块的基础上, 针对原系统在实际应用中的不足, 引

入时域峰值识别法, 打破了对数据的限制, 提高了分析长数据段的能力。并且建立了长短数据层分析方法, 将数据分长短段、分两级进行分析, 以及不同系统的数据转化分析方法, 将不同系统采集到的数据进行对比分析相互验证。改进后的系统模块分析能力加强, 可信度提高, 对离线数据、在线数据均可分析, 也可同时对比分析, 增加了系统的灵活性, 离、在线也相互结合, 具有现实意义和工程使用价值, 在实际运行中已取得了令人满意的效果。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王慧铮, 许勇. 基于广域测量系统的低频振荡监测分析方法研究与应用 [J]. 电网技术, 2008, 32(22): 56-61.
- [3] 鞠平, 谢欢, 孟远景, 等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 56-60.
- [4] 肖晋宇, 谢小荣, 胡志祥, 等. 电力系统低频振荡在线辨识的改进 PRONY 算法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2004, 44(7): 883-887.
- [5] 王铁强, 贺仁睦, 徐东杰, 等. Prony 算法分析低频振荡的有效性研究 [J]. 中国电力, 2001, 34(11): 38-41.
- [6] 董航, 刘涤尘. 基于 Prony 算法的电力系统低频振荡分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 97-100.
- [7] 张贤达. 现代信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [8] 谢小荣, 肖晋宇, 童陆园, 等. 采用广域测量系统信号的互联电网区间阻尼控制 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 37-40.

作者简介:

张彦军 (1981-) 男, 研究生, 主要研究方向为电力系统调度自动化及高层应用。

常喜强 (1976-) 男, 研究生, 主要研究方向为电力系统分析及控制。

刘 冉 (1975-) 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统调度自动化网络技术及控制。

(收稿日期: 2009-04-20)

欢迎订阅《四川电力技术》