

运用 GPS 测量技术的临界机组判别

薛飞,陈允平

(武汉大学电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 提出了一种在电力系统暂态稳定分析中判别临界机组的方法。它运用基于 GPS 的相量测量技术,利用故障期间发电机转子角速度的增量和预测功角曲线来在线识别临界机组,为单机能量函数法提供分析的参考依据,对促进这种方法的在线应用进行了尝试。经仿真计算,可得到较满意的结果。

关键词: GPS; 临界机组; 能量函数; 暂态稳定

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)02-0016-03

1 引言

自基于 GPS 的相量测量技术应用于电力系统暂态稳定分析以来,大多研究工作集中于利用测量得到的发电机转子角度和角速度等参数预测和分析系统的摇摆情况,并直接以此作为判断系统稳定性和紧急控制的依据,如文献[2][3]。它们采用的是建立在仿真试验基础上的经验判据,这就决定了其不可能对系统的稳定性进行定量的分析。此外,预测算法精度不高,直接用来判断稳定性,难以保证准确性。而长期以来,能量函数法具有公认的定量分析稳定性和快速的特点,但在实际应用中却存在很多困难。如何利用新兴的 GPS 测量技术促进能量函数法的发展,也成为一个热点研究方向。单机能量函数法自出现以来,其应用的一大难题是临界机组的在线识别。本文提出了一种基于 GPS 测量技术在线识别临界机组的方法,为单机能量函数法提供参考依据。文献[2]曾提出根据机组平均角度差将系统划分为两群机组。这种方法缺少实际理论依据,且以简单的平均值作为判别依据,没有考虑机组失稳时转子角度随时间变化趋势的特点。本文的方法从机组的动能势能转化观点出发,并考虑了临界机组转子角度的曲线特点,可以得到较为满意的结果。

2 在线识别临界机组

2.1 在线识别临界机组的机理

所谓的临界机组是指在故障期间受到严重的能量冲击,在故障后的暂态过程中与其他机组失步分离的机组。故障期间发电机转子上承受着机械输入转矩和电磁转矩形成的不平衡转矩,在故障期间改变了发电机的转子动能。所以,故障时注入系统的干扰能量主要是以动能形式注入了发电机组。根据

单机能量函数理论,机组的稳定性取决于在机组势能能达到最大值之前,其吸收的动能是否能完全转化为势能。所以,故障期间机组动能的增量是判别临界机组的一个重要根据。

在故障发生瞬间 t_0 各机组以同步转速 ω_N 运行,则相对于同步参考坐标,机组的动能 $V_0 = 0$ 。在故障切除的瞬间 t_c ,发电机相对于同步坐标的动能为:

$$V_c = \frac{1}{2} M \omega_c^2 \quad (\omega_c \text{ 为相对于同步坐标的转速, } M \text{ 为该机组的惯性常数})$$

设我们可以得到该机组失稳的临界动能增量的理论上的准确值:

$$V_{\text{临}} = \frac{1}{2} M \omega_{\text{临}}^2 \quad (\omega_{\text{临}} \text{ 亦为相对于同步坐标的转速})$$

当 $V_c/V_{\text{临}} = (\omega_c/\omega_{\text{临}})^2 < 1$ 时,判别机组为非临界机组。前式可简化为:

$$\omega_c/\omega_{\text{临}} < 1 \quad (1)$$

但实际上,目前尚找不到完整可行的算法来求取机组的临界动能增量精确的理论值,也就无法得到临界角速度的精确理论值。所以,实际应用中临界角速度是离线仿真的经验值。在离线仿真中,应对于系统几种通常的运行工况分别确定对应的临界值,且临界值取值要偏于保守,保证只可能将非临界机组误判为临界机组,而不会将临界机组判断为非临界机组。考虑到基于 GPS 的测量技术对角速度的测量精度,以及临界角速度的确定是基于离线仿真的经验值,所以该方法只能作为粗略筛选临界机组的手段。但它已可以排除绝大部分的非临界机组。

经过对基于 GPS 的功角测量技术的发展研究,我们已有了快速预测发电机功角曲线的方法。这种

方法由于对计算速度的追求,采取简化的数学模型和计算方法,因而其精度不如数值仿真曲线,不足以直接用于精确的稳定分析。但它已足可体现出暂态过程中各机组功角曲线间的相对趋势,可以判断出与其它机组趋于分离的临界机组。我们把第一步排除的非临界机组中($c/\delta_{\text{临}}$)值最小的机组认为是最稳定的机组,以它作为参考机组。当发现某一机组在连续 P 个(P 值预先设定)预测点与参考机组的功角差都大于某一临界值 $\delta_{\text{临}}$ 时,即确定其为临界机组。此处的功角差临界值是通过对系统不同的运行工况进行仿真确定的。由于离线仿真不可能完整考虑所有可能的运行情况,所以取值时要偏于保守。这样可以避免将临界机组误判为非临界机组,但有可能将非临界机组误判为临界机组。由文献[1]可知,这样只是计算了多余机组的能量函数,增加了计算量,不影响稳定判断结果。 P 值的引入,是为避免将短时震荡误判为失步。因为机组失步,功角差随时间不断增大,应在足够长的时间里(P 个预测点)大于临界值。

2.2 功角曲线的预测方法

第 K 个时刻发电机角速度增量 $\omega(k)$ 可按下式计算:

$$\omega(k) = \frac{P_m(k) - P_e(k)}{M} t \quad (2)$$

角速度 $\omega(k)$ 和转子角度 $\delta(k)$ 可按下列式计算:

$$\omega(k+1) = \omega(k) + \omega(k) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \delta(k+1) &= \delta(k) + \frac{1}{2} [\omega(k+1) + \omega(k)] t = \\ &= \delta(k) + \omega(k) t + \\ &+ \frac{1}{2} \times \frac{P_m(k) - P_e(k)}{M} \times (t)^2 \quad (4) \end{aligned}$$

(k) 均为相对于同步转速的发电机转子角速度。

电磁输出功率,取发电机电势 E 恒定,由下式预测:

$$P_{ei}(k+1) = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n [E_i E_j B_{ij} \sin \delta_{ij}(k+1) + E_i E_j G_{ij} \cos \delta_{ij}(k+1)] \quad (5)$$

G_{ii} 、 G_{ij} 、 B_{ij} 分别为导纳矩阵中发电机节点自导纳的实部、互导纳的实部与虚部,可由故障后系统结构求得, E_i 、 E_j 可由稳态值求得。

机械输入功率按常数处理,负荷模型采用恒定阻抗模型。

根据以上算法,当采集到足够数据后,可以快速

计算各发电机转子角度的未来走向,在机组实际失步之前判断出它们的震荡趋势以判别临界机组,这正是预测的意义所在。显然,这样对计算速度要求很高。所以,我们选取 $c/\delta_{\text{临}}$ 值最小的机组作为参考机组,这样,我们只需预测第一步筛选剩下的机组和参考机组的功角曲线(这时的机组数量是很少的),而不必计算所有发电机的转子角度,且由于仅用单机能量函数分析机组的第一摆稳定性,所以预测时间很短,计算量很小。但这是基于一个前提,选取的参考机组是系统中相对最稳定的,这样才能使被考查机组与参考机组的角度差体现出它们与非临界机组的变化趋势,这就使 $c/\delta_{\text{临}}$ 的选取更关键。

由于基于 GPS 的相量测量单元不停采集数据,因此可采用滚动预测技术,不断更新初值,提高预测精度。

3 结合单机能量函数法分析系统暂态稳定性

同步坐标下,单机能量函数可表示为:

$$\begin{aligned} V_i &= \frac{1}{2} M_i \left(\dot{\delta}_i - \frac{1}{M_T} \sum_{j=1}^n M_j \dot{\delta}_j \right)^2 - P_i \left(\delta_i - \right. \\ &\left. \frac{1}{M_T} \sum_{j=1}^n M_j \delta_j - \delta_i^s + \frac{1}{M_T} \sum_{j=1}^n M_j \delta_j^s \right) + \\ &\sum_{j=1}^n C_{ij} \int_{\delta_i^s}^{\delta_i^0} \sin \delta_{ij} d(\delta_i - \delta_j^0) + \\ &\sum_{j=1}^n D_{ij} \int_{\delta_j^s}^{\delta_j^0} \cos \delta_{ij} d(\delta_i - \delta_j^0) + \\ &\int_{\delta_i^s}^{\delta_i^0} P_{Coi} d(\delta_i - \delta_i^0) \quad (6) \end{aligned}$$

其中: $P_{Coi} = \sum_{i=1}^n (P_i - p_{ei})$

根据文献[1]计算单机能量函数的理论,我们把它与识别临界机组的方法结合起来。步骤如下:

第一步,对故障后网络,稳定平衡点和短路导纳矩阵是给定的。

第二步,对每一个考查的故障点,相对于不同的运行工况,按照前文阐述的原则利用离线仿真确定相应的各发电机转子角速度增量的临界值 $\omega_{\text{临}}$,以及前述的发电机功角差的临界值 $\delta_{\text{临}}$ 和 P 值,对应于相应的故障点和运行状态将它们存储起来。

第三步,对每一个考查的故障点,仿真一个持续性故障。沿故障轨线计算各机组各时刻的能量函数

$V_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。检验 V_i 和其各个组成部分,取 $V_{i/critical}$ 临界值等于其势能 V_{PE} 的最大值,并对应于每一个故障点存储起来。

第四步,对一给定的故障,在故障发生并清除后,计算各机组角速度增量 $\dot{\delta}_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。将各机组的角速度增量与各自临界值相比较,当:

$$\dot{\delta}_i / \dot{\delta}_{i/critical} < 1$$

确认该机组为非临界机组。在非临界机组中 $\dot{\delta}_i / \dot{\delta}_{i/critical}$ 值最小的机组 m 被选为参考机组。

第五步,预测上一步剩余的机组和机组 m 的功角曲线,并计算 $|\delta_{im}(k) - \delta_m(k)|$ 。当:

$$|\delta_{im}(k+j) - \delta_m(k+j)| > \delta_{i/critical} \quad (7)$$

则判断机组 i 为临界机组。

第六步,计算临界机组在 t_c 时的暂态能量 $V_{i/t=t_c}$ 。

判别稳定性。如果 $V_{i/t=t_c} < V_{i/critical}$,临界机组稳定,系统稳定;如果 $V_{i/t=t_c} > V_{i/critical}$,则临界机组不稳定,系统不稳定。

4 系统基本结构

系统的基本结构设置如图1所示:

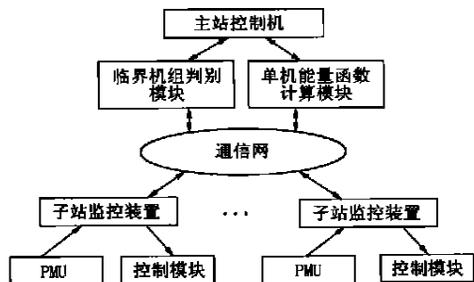


图1 系统的基本原理结构

主站位于电网的调度中心,主站控制机主要由临界机组判别和单机能量函数计算两个模块组成。子站监控装置由各发电厂的PMU模块和控制模块组成。子站监控装置的PMU模块实时采集各发电机组的电磁功率、机械功率、转子角度、角速度、角加速度等,并经通信网将这些采集到的数据和其它判断系统工况所需要的模拟量和数字量传送到主站控制机。主站控制机利用这些数据,按前述方法判别临界机组并计算单机能量函数,判断系统稳定性。主站的控制命令可传送到子站,由其控制模块执行。

5 仿真算例

利用这种算法,计算文献[1]研究的IEEE 20机118母线系统,对比文献[1]的计算结果,临界机组的判断是很准确的,在此基础上利用单机能量函数法分析系统稳定性是可行的。

6 讨论

基于GPS的相量测量技术给能量函数法的发展,创造了一个更加广阔的空间。本文仅基于这一技术,对解决在线识别临界机组的问题提出了一种方案。这种方法利用了很多临界值,而这些临界值都是离线仿真确定的。对于一个较大的系统,这个离线计算量是很大的,而其对于系统运行状态改变的适应能力较差。此外,由于目前在技术上,系统机组的功角和角速度等参数,是实时可测的,如何利用这一手段来完善能量函数法的求解,也有待于进一步的探索。

参考文献:

- [1] Michel A N, Fouad A A and Vittal V. Power System Transient Stability Using Individual Machine Energy Functions [J]. IEEE Trans On Circuits and systems, CAS-30, 1983, 5: 266-276.
- [2] 郭强, 刘晓鹏, 吕世荣, 等. GPS同步时钟用于电力系统暂态稳定性预测和控制[J]. 电力系统自动化, 1998, (6): 11~13.
- [3] 郭强, 刘晓鹏, 吕世荣, 等. GPS同步时钟用于电力系统暂态稳定控制的初步研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 1996, 8(3).
- [4] 余贻鑫, 陈礼义. 电力系统安全性和稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [5] 刘笙, 汪静. 电力系统暂态稳定的能量函数分析[M]. 上海交通大学出版社, 1996.
- [6] Liu C W, Thorp. Application of synchronized phasor measurements to realtime transient stability prediction[J]. IEE Proceeding-C, 1995, 142(4): 355-360.

收稿日期: 2001-06-09; 修回日期: 2001-07-20

作者简介: 薛飞(1977-),男,硕士,主要从事电力系统暂态稳定和自动化方面的研究; 陈允平(1945-),男,博士,博导,主要从事电力系统稳定控制及继电保护的研究与教学工作。

(下转第59页)

的几条线路与远端的水电厂相联。这样当某段母线上失电时,分段的备自投并不能直接将备用电源投入,因为备自投装置无检同期功能;而设置在与水电厂相联出线的断路器的测控装置具有检同期合闸功能。该文采用了如下方式:即先断开与水电厂连接的线路,再启动备自投,然后再逐个通过检同期合上各条与水电厂连接线路。如果将同期功能集成在BZT装置中,则只需要在备自投的过程检同期合闸就行了,简化操作。

3.3 厂用电快速备自投

在火电厂的厂用电切换过程中,备投就是一个快速备自投的问题。在工作电源消失后,大容量的旋转机械使母线上电压的衰减是个逐渐下降的过程,并不是立即消失。由于电动机群的惯性作用,残压的幅值和频率是变化的,备用电源投入中,也存在一个最佳合闸时机的问题。一般最佳投入时间为失电后第一次的30°角差范围内,对装置来说快速地处理器DSP及快速出口继电器的选择就很重要了。在失去第一次快速备自投入的机会后,等待下一次合闸时机又是同期的问题。

4 小电流接地系统的接地选线

100%的准确选线是个困扰多年的难题。常规的集中式选线装置的问题是:1)多拉电缆;2)可能要改造CT;3)只引入零序电流,分析要素少,准确率低;4)不符合变电站自动化分布式的设计思想。

中性点经消弧线圈接地系统,零序电流与零序电压的夹角方向没有明确的反向关系,较难检测;5次谐波方法又存在信号小、信噪比低,准确度差的问题。

文献[4]中提供了一种SIEMENS公司高灵敏接地保护的检测原理,可以借鉴。它的判断依据是零

序有功和零序无功的方向及大小。其长处是充分利用了零序电压、零序电流的方向和幅值,利用不同形式的点积来分析问题。SIEMENS在信号的处理、TA误差角的补偿等方面作了很多工作,来弥补一次系统信号弱的问题。

SIEMENS仍是从二次侧考虑,二次不足一次补,能够更好地解决这个问题。例如很多站中已装设自动调谐线圈,将自动消谐与接地选线做在一起可以更好。在调谐的过程中,只有接地线路的零序电流改变,而非接地线路中流过的仍是容性电流,采用简单的差分技术就可准确分辨出故障线路。没有加装可调谐线圈的站中,可在消弧线圈与地之间串接一个功率电阻,平时用一对动断触点将其并联掉,当检测到接地($3U_0$ 启动)时,断开常闭触点,串入电阻,改变流过消弧线圈到地的阻性电流分量,只需串入0.5s的时间,即可判断出接地线路;此法准确实用,但需要改造一次设备。

参考文献:

- [1] 钱晟,汪福明,黄立军.智能双微机自动准同期装置的设计[J].电力系统自动化,1999,(14).
- [2] 严浩军.变电站电压无功综合控制策略的改进[J].电网技术,1997,(10).
- [3] 王风华.列西变110kV系统备用电源自投方案研究[J].电力自动化设备,2000,(12).
- [4] 曹团结,诸伟楠.西门子高灵敏接地保护装置的原理分析及应用[J].电力系统自动化,2001,(2).

收稿日期:2001-06-27; 修回日期:2001-08-15

作者简介:王立宁(1971-),男,博士,研究方向为电力系统厂站自动化;张忠宇(1965-),男,大学本科,研究方向为电力系统厂站自动化;刘志军(1973-),男,工程师,研究方向为电力系统厂站自动化。

Discussion on the key technology on the security automation device for substation automation system

WANG Li-ning, ZHANG Zhong-yu, LIU Zhi-jun

(Yantai Dongfang Electronic Industry Group, Yantai 264001, China)

(上接第18页)

Discrimination of critical machines in GPS measurement technology

XUE Fei, CHEN Yun-ping

(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A new approach for on-line recognition of critical machines in the investigation of power system stability is presented. It is based on GPS phasor measurement technology and takes use of the rotating speed increment of generator rotor and prediction of power angle curve to recognise the critical machines. It offers information of reference for individual machine energy function to promote this method being used on line. After simulation test, we can get satisfactory result.

Key words: GPS; critical machine; energy function; transient stability