

基于 GPS 的功角测量及同步相量在电力系统中的应用研究

龙厚军, 胡志坚, 陈允平

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对 GPS 技术在电力系统中的广泛应用, 系统介绍了现有的发电机功角直接和间接测量方法, 并分析了其优缺点; 具体论述了基于 GPS 同步测量的同步相量在电力系统状态估计, 稳定控制, 失步预测保护等方面的国内外应用发展情况。并指出基于同步相量的区域稳定控制理论还待进一步研究和突破。

关键词: 功角测量; 相量控制; 暂态稳定; 状态估计; 全球定位系统

中图分类号: TM930.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)03-0039-06

0 引言

从 20 世纪 60 年代美国开始进行空中定位研究, 1974 年基于 GPS 概念的全球定位系统开始正式研制, 1985 年进入民用领域, 1993 年此系统正式建成。20 世纪 90 年代以来基于全球同步卫星定位系统 (GPS) 的高精度定时技术逐步被引入电力系统。由于其时间误差小于 $1 \mu\text{s}$, 对于 50 Hz 的工频信号来说其相应的相位误差不超过 0.018° , 从而利用 GPS 的高精度时钟可实现对电网运行变量的实时同步采集, 并可在此基础上得到电压电流相量和发电机功角这些反映系统运行状态的重要参数。

电力系统中功角稳定性、电压稳定性、频率动态变化及其稳定性皆不是各自孤立的现象, 而是相互诱发相互关联的统一物理现象的不同侧面, 其间的关联又受到网络结构和运行状态的影响。这其中母线电压相量及发电机功角状况是系统运行的主要状态变量, 是系统能否稳定运行的标志。如果它能被直接测量, 不仅能用于调度中心的集中监视和控制, 而且能用于分散的就地监视和控制, 提高状态估计的可靠性, 更有可能完全实现电力系统的实时自动控制, 解决系统的稳定问题。因此实时测量发电机的功角和母线电压相量, 将是电力系统稳定监视和控制的关键。

通过基于 GPS 实时相量测量, 可以实时得到电网的状态量, 即可以得到实际系统精确模型的历史数据和当前轨迹。由于相角涉及到电力系统的监视、控制和保护等诸多领域, 而实时相量测量的实现, 将推动电力系统的监视、控制和保护等新方法和理论的发展, 为电力系统的稳定控制和保护开辟一个新的领域。

1 功角测量

1.1 功角及功角测量

功角表示发电机内电势和参考点电压之间的相位差, 即表明了各发电机转子之间的相对空间位置, 而这恰好是判断各发电机之间是否同步运行的依据。

由于发电机的不同步运行或者系统振荡, 会危及发电机及变压器甚至整个系统的安全, 振荡电流的持续出现, 将使大型汽轮发电机定子过热, 端部遭受机械损伤, 使大轴扭伤, 缩短运行寿命。从电力系统安全稳定的客观要求出发, 发电机的失步预测和保护十分必要。所以发电机转子功角的获得方法一度是许多学者积极探索的课题。

1.2 现有的功角测量方法

1.2.1 间接测量法

间接测量就是通过已知的参数, 计算功角。

传统的做法是若已知电抗 X_d (隐极机) 或 X_q (凸极机), 在测取电压、电流及相应的 ϕ 角后, 根据相应的矢量图可算得功角^[1]。

相似的, 若已知 X_d 、 X_q 、 X_d' 、 X_q' 和 X_q'' 则可分别得到稳态、暂态以及次暂态状况下的 δ 角。

用该方法获得 δ 角, 必须满足以下两个条件: 首先要求确定上述参数, 并且这些参数要求非常准确; 其次, 在电力系统发生故障时和故障后, 在具体的某一时刻应确定采用哪些参数 (同步电抗、暂态电抗或次暂态电抗)、哪一种发电机等值模型进行计算, 而实际上, 这难以确定; 该方法在稳态过程具有良好的测量精度, 测量误差小于 1° , 而在暂态过程中, 采用暂态电抗或次暂态电抗计算出来的功角有一定的误差, 即使采用诸如 FFT 之类的信号处理手段也无法解决这一问题。而且测量计算时间太长, 不适合实时稳控系统的实时测量。

文献[2]提出利用基于 GPS 同步时钟的相量测量装置 PMU 来获得系统中各主要站点的功角。Phadke 博士开发的相角测量装置,其测量原理是对三相电力线上的波形每个周期采样 12 次,然后以递推 FFT 提取出基波分量,最后用对称分量法将三相组合起来产生正序相量,对应国际标准时间 UTC 产生一个绝对的相角。文献[3]也是通过分析机端电压的零序谐波分量来测量同步电机的转子角。

基于 GPS 同步时钟的相量测量装置 PMU 是在采样电压和电流后再经傅里叶变换才能得到发电机转子功角,也较为耗时。

1.2.2 直接测量法

利用转子位置与空载电势在相位上的对应关系,用转子位置信号代替空载电势参与相位比较。

较早应用的是闪光灯法^[4]。是在被测试同步机的轴上装一金属圆盘,在圆盘上洒上与被测试电机的极对数相同的明显的标记。当电机运行时,用闪光灯照射圆盘,闪光灯的电源来自被测试电机的端电压,并将闪光灯置于同步档,这时闪光灯的闪光频率与被测试电机的转速同步,看上去圆盘上的标记的位置静止不动。在金属盘的圆周外围安装一个静止的圆弧形刻度盘,先确定被测试电机空载时标记的位置。当被测试电机带负载后,再观察标记位置相对空载时所偏移的电角度,这就是被测试同步电机的功角大小。这种方法比较直观,但当被测试电机的极对数较多时其测量的准确度不高。

相位计法^[4]是在被测试电机的电枢槽口安装几匝细导线作为 d 轴位置的测量绕组,其极距应与该电机原有绕组一样;或在被测试电机的轴上安装一台极数相同的,其 d 轴与主机重合的微型同步电机,以便获得空载时电势 E_q 的信号。将被测试电机的端电压 U 经过移相器和空载电势 E_q 的信号一起送到相位计。当被测试电机空载运行时,调节移相器,使相位计的指示为零,被测试电机带负载后相位计的读数即为功角 δ 之值。如果是采用带有模拟量输出的相位计,可测得与被测功角 δ 成正比的电信号,结合用光线示波器可拍摄功角 δ 变化的动态过程曲线。或者用微型计算机控制的数据采集系统,获取功角 δ 变化过程的数据。这种方法实行难度大,因为电机改造绝非易事。

数字式功角测量仪^[4]是在被测试电机的轴上装一个投射式或反射式的光电圆盘,盘上均匀分布的孔数或黑白相间的标记块数与被试电机的极对数 p 相等。当圆盘随同步电机作同步速旋转一周时,光

电二极管产生代表 E_q 的矩形脉冲。由带可调电阻的 RC 移相器给初始零相位的设定提供移相之用,即当被试电机为空载($\delta = 0$)时,调节机端电压 U 的相位使之与 E_q 同相,当被试电机带负载时,输出的脉冲宽度折算成的角度即代表被试功角的大小。实际上是通过获得机端电压与其空载电势过零点的时间差,然后转换成相应的角度,即采样 Δt 相位检测 Δt 时间差 Δt 显示(即 $\phi - T$),以测取功角。但是该方法仅仅给出了测量功角的一个方法,并不适于实时监视。因为测量功角要求有一个空载过程,以便取得实际测量时的 E_q 相量角度,在实际应用中特别是在实时检测系统中,这是不现实的。

磁阻位置传感器法^[5]通过磁阻位置传感器来测量电机转轴的位移获得发电机空载电势 E_q 矢量。设电机磁极为一对,利用电机转轴装有的 60 磁齿齿轮,由磁阻位置传感器产生的信号频率为 $50 \times 60 = 3000$ Hz,当转速为额定转速时,将信号整形后经 60 分频器即可获得所需要的方波信号。首先进行一次空载过程,以获取方波信号与从电压侧得到的方波信号相位之差,调整磁阻传感器的安装位置,直到上述偏差为零。带负载后,所得差值即为功角 δ 。

文献[6]通过分析功角 δ 也为产生矢量 E_0 的转子主磁通和产生端电压的合成磁通(由转子磁通、定子电枢反应磁通和漏磁通合成)之间的相角,即测量转子磁极中心线与合成的等效磁极中心线间的电角度来获得功角。

无论汽轮发电机组还是水轮发电机组都装有测速装置,因此文献[7]提出利用转速表来测量功角。该装置的构成是:在发电机的轴上安装一个 60 个齿的齿轮,这 60 个齿大小完全一样,均布在圆盘上。转速表的测量电路负责检测齿轮所发出的脉冲,每 60 个脉冲代表转子旋转一周。转子的瞬时速度由式(1)表示(T_0 为两个相邻脉冲的时间间隔):

$$\omega(t) = \frac{2\pi}{60 T_0} \quad (1)$$

在确定转子转速后,转子位置由式(2)确定:

$$\theta(t) = \int_{t_0}^t \omega(t) dt + \theta_0 \quad (2)$$

只要已知转子在初始时刻的位置 θ_0 以及任意时刻的速度 $\omega(t)$,就可以准确地确定转子在任意时刻的位置 $\theta(t)$ 。 $\omega(t)$ 由转速表负责测量,其测量精度与电力系统的稳定状态无关,所以在正确确定 θ_0 后,能通用于电力系统的任意状态,并且也通用于汽轮发电机组和水轮发电机组。

文献[8]则提出利用转子位置检测器和发电机功角转速测量装置来直接获得系统功角和转速,进而监视系统稳定性。其中位置检测器由同轴装的3个圆盘组成,即发光盘、遮挡盘、光敏盘。光敏盘固定在定子上,遮挡盘与转子为弹性连接并同轴旋转。发光盘上装有发光二极管,光敏盘上装有光敏三极管,遮挡盘上有一个圆孔,当转子带动遮挡盘旋转后,光敏三极管收到光信号的变化,呈导通和截止两个状态。文献[9]也提出用发电机调速系统来直接测量发电机功角,是利用转速测量装置经分频得到与 E_q 向量的频率始终保持一致的正弦波,通过一定的算法与系统电压比相,再对所得相角预校正求出发电机的功角。

文献[10]提出了两种直接测量功角的方法:传送波形的测量方法和利用同步时钟的测量方法,并对两种测量方法精度和误差进行了分析。前者对通道的质量要求很高,要求调制解调器和传输通道在传送过程中不发生波形失真。另外收端必须对对方传送过来的波形进行时延和相移补偿,而由于气候、环境等因素的影响,时延和相移测量结果往往不很准确,这就严重地影响了功角测量的精度。如果利用两个精度很高的同步时钟即可避免上述问题。

文献[11]介绍了一种同步发电机功角的高精度测量方法。这种方法采用转子位置传感装置和误差软件补偿技术,并利用 GPS 高精度授时信号实现异地信息同步采集。用转子位置信号代替空载电势参与相位比较。转子位置信号通过装设转子位置传感装置获得。发电机功角可以通过测量转子位置信号与发电机端电压信号的相位差得到,其值等于空载时的相位差减去负载时的相位差。并对测量误差的来源、性质及其软件补偿技术作了描述。

2 同步相量的应用

随着基于同步技术的电网相角监测系统的采用,实时精确测量系统中各关键点的电压电流相量,使得人们能实时地看到系统的状态,从而在电力系统中利用 GPS 同步相量实施相量控制这一电力系统稳定控制最直接的方法成为可能。

相角测量可望在电力系统的状态估计、静态稳定的监视、暂态稳定的预测及控制和自适应失步保护方面发挥其作用^[2,12,13]。

1) 应用 PMU 在电力系统做了很多试验研究,如短路试验^[14]、切机试验、甩负荷试验、发电机失磁试验^[15]、线路的开断试验^[16]等。通过 PMU 做的这

些试验,使人们首次看到了系统的动态行为,认识到了以往所没有认识的现象和规律。对于动态电力系统建立的系统元件数学模型难以通过现场试验进行验证,数学模型的参数也很难准确确定,从而影响了数字仿真的精度和数学模型的适用范围。基于 PMU 的同步相量提供了一种验证数学模型和对其进行参数估计的基础。并能应用于系统负荷模型的建立,系统等值等方面。

2) 系统的状态估计是一种数学方法,通常状态估计是求解系统的特征非线性方程,确定系统的稳定性,然而其计算时间比较长,难以在暂态过程中得到应用。若系统在所有节点安置相角测量装置,它对电压相量的状态估计是一个线性估计或状态确定;若系统在部分节点安置相角测量装置并使系统可观察时,它对电压相量的状态估计是一个线性估计。因此将同步相量值加入到现有的状态估计中,可提高状态估计的精度,做到实时运行。

文献[17]归纳了由同步正序电压空间矢量族出发,网络的状态估计只需解线性代数方程,系统的动态状态估计便可方便地实现。文献[18]提出了称之为使潮流方程直接可解的 PMU 配置方案。通过讨论电压型 PMU 的配置,目标是使潮流方程直接可解。因电力系统结构的高度的稀疏性,有可能通过对部分节点适当配置 PMU,即适当安排节点类型中 PQV 节点和 PV 节点的数量和分布,使潮流方程按一定顺序形成一种可解结构,形成一种非迭代的直接求解潮流方程的方案,进而可以获得全部节点的电压相量。并定量地分析引入 PMU 以后对状态估计精度的改善程度。

3) 相角测量得到的同步相量能极大地改善系统稳定的预测及控制。

调度中心可根据各个点的实时相角,建立全系统的实时相角集中监视系统,给调度员提供预防故障的措施或减少事故影响的补救办法,根据相角信息可采取紧急措施(如切机、甩负荷、解列等),防止系统的崩溃。

最常用的预测方法是在实测相角曲线的基础上利用自回归(AR)、多项式^[19,20]或频角关系等预测相对角度的轨迹,然后以角度大于某一限制值或依据预测模型的稳定性判断系统的稳定性。但是其误差随预测长度的增加变大,在暂态初期,轨迹变化较剧烈时,预测精度更难保证。而且角度判稳的标准一般为统计值,其正确性缺乏理论证明。

文献[21]提出分段恒流等效法。基本思想是直

接利用电力系统的详细模型,用当前时刻的实测电压向量作为输入,通过逐步积分法预测未来一段时间内系统的轨迹,在发电机角度变化的微小邻域内假定负荷为恒流源,当发电机角度超出界限时,更新负荷的等效恒流源。

文献[22]提出的方法的基本思路是由发电机的同调特性在大量仿真观察的基础上根据功角对发电机进行离线预分群,在线动态修正。另外还有为自适应失步保护^[23]提供出口动作启动条件的稳定预测方法。它首先把系统等值成双机系统,然后利用安装在两个区域间联络线变电站的相量测量单元(PMU)测量的电压电流相量推算等值机的运行状态,再利用等面积法则(EAC)判断系统的稳定性,当发现系统失去稳定后该装置可以分离失步区域。

文献[24]提出了基于同步相量测量单元的预测型振荡解列方法。振荡中心两侧母线电压的相角差反映了功角差,利用该相角差的变化速度及符号,可以判定是同步振荡还是异步振荡以及滑差的情况,并实现预测解列功能。

S. E. Stanton 等人从部分能量函数^[25]出发,分析多机系统中单机的能量,提出用 PMU 检测发电机的转速的最大数值,并和由能量函数理论通过离线仿真求得的转速坎值比较决定切机量。

较新的智能预测法采用模式识别、神经网络和模糊推理等人工智能手段以实现暂态稳定的快速预测。如文献[26]提出的决策树法通过对不同运行方式和不同故障的仿真计算,仅使用机组的内电势角度作为输入,针对不同训练机集组合构造多个决策树。文献[27]提出一种基于模糊神经网络实时预测系统暂态稳定性的方案。但它采用 PMU 在故障切除后 8 个周波内的测量结果作为输入,输入数为发电机数的 6 倍,当系统规模较大时,训练过程非常困难。文献[28]提出基于模糊分类的径向基网络模型及算法,先利用无导师学习方法按照样本的特性,对输入样本进行模糊分类,然后对各类样本分别训练径向基网络,进一步提高了训练速度。利用同步相量测量装置获得的故障后短时间内各发电机的功角,经简单运算后作为神经网络的输入,其输出为多机电力系统稳定性的分类结果。

另外,电压稳定分析中的方法如潮流多解法、雅可比矩阵奇异、灵敏度分析法等,都需要不同程度的复杂计算,应用于电力系统实时控制时存在一定的困难。国内外一些学者直接利用电压相量进行电压稳定分析和实时控制已作了一定的工作,F. Cubina

等人的研究^[29]认为,即使在复杂系统中,电压相量所含的信息足以确定电压稳定的裕度,并推导出用电压相量法来决定电压崩溃的近似指标算法。文献[30]提出了利用节点的实时信息:电压相量、电流等和来自系统的准实时信息,将整个系统等值,导出了电压稳定实用判据。文献[31]提出了基于图论的分簇算法和两个相关性的判据,用一个节点测量的电压相量代替整个簇的节点电压相量,形成近似雅可比矩阵,求出最小奇异值作为电压稳定近似指标,该方案已运用于实时控制中。文献[32]提出了利用节点电压相量计算的新的电力系统电压稳定指标(VSI),计及网络的不同拓扑结构,运用修改的图论方法导出寻找最弱传输路径的简便算法。

在暂态稳定控制方面,文献[33]进行了基于 GPS 同步时钟测量各发电机功角和转子速度,用它们作为信号对发电机进行非线性励磁控制的研究,与取系统中一台机为无穷大机的控制方法相比,将具有更优良的控制性能。

电力系统实时相角测量系统能为集中控制提供相角信息,基于 GPS 的稳定控制只有针对多机大系统才能发挥其优势,而多机系统稳定控制理论方法的滞后使得目前的电力暂态稳定在线控制的研究多是基于在线预决策或暂态安全分析,真正利用 GPS 同步监测系统提供的同步相量的同步相量区域稳定控制理论还待进一步研究。还可以将相量信息提供给就地控制使用,可以实现分散的暂态稳定控制。

4) 相角测量用于系统失步保护可以简化参数的设计。应用测得的相角条件作为判据,能够不必考虑故障的类型,设定参数非常容易。应用相角这个量必将会产生新的保护思想和装置。文献[34]针对发电机失步预测保护所存在的问题,介绍了一种基于功角直接测量的自回归预测失步的方法,并在此基础上提出了一套完整的保护方案。文献[35]提出利用势能概念的基于同步电压电流测量相量的精确在线检测失步技术。随着电力系统互连网络的增大,控制系统和保护越来越复杂,实时相角测量为电力系统的稳定控制和保护开辟了一个新的领域。

5) 灵活输电系统(FACTS)在提高线路输送能力、阻尼系统振荡、快速调节系统无功、提高系统稳定等方面的优越性能,而将相角测量装置的实时相角送到 FACTS 中^[36],可简化其控制算法,从而得到更加灵活的控制。

3 结束语

利用 GPS 同步测量可以快速、精确地获得电力

系统的历史数据和实时状态, GPS 技术的应用必将对电力系统的安全稳定控制带来革命性的变革,因此必然成为今后发展的重点;基于同步相量区域稳定控制理论的进一步研究,实时相角测量必将为电力系统的稳定控制和保护开辟一个新的领域。目前的技术条件已经基本满足,当务之急是建立和发展以 GPS 为基点的电力系统安全稳定控制理论。

参考文献:

- [1] 何仰赞,温增银,等(HE Yang-zan, WEN Zeng-yin, et al). 电力系统分析(下)(修订版)(Power System Analysis, Revised) [M]. 武汉:华中理工大学出版社(Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press), 1995.
- [2] Phadke A G. Synchronized Phasor Measurements in Power Systems[J]. IEEE CAP, 1993, 6(2): 10-15.
- [3] de Mello F P. Measurement of Synchronous Machine Rotor Angle from Analysis of Zero Sequence Harmonic Components of Machine Terminal Voltage[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(4): 1770 - 1777.
- [4] 徐伯雄, 龚玉琴(XU Bo-xiong, DOU Yu-qin). 电机量测(Electromotor Measurement) [M]. 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 1990.
- [5] 陈昊(CHEN Hao). 电力系统功角测量(硕士论文)(Power Angle Measurement, Thesis) [D]. 武汉:武汉大学(Wuhan: Wuhan University), 1998.
- [6] 袁萍生(YUAN Ping-sheng). 新型发电机功角测量装置的设计(The Design of Generator Power Angle Measuring Device) [J]. 广东电力(Guangdong Electric Power), 1997, (3): 43 - 45.
- [7] 严登俊,等(YAN Deng-jun, et al). 基于 GPS 时钟信号的发电机功角实时测量方法(Real-time Power Angle Measurement of a Synchronous Generator Based on GPS Clock Signal and Tachometer) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(8): 38 - 40.
- [8] 董清, 单波, 等(DONG Qing, SHAN Bo, et al). 一种发电机稳定监控的实现方法(Implementation of the Method for Improving and Monitoring Generator Stability) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(10): 14 - 16.
- [9] 李鹏, 卢玉平, 等(LI Peng, LU Yurping, et al). 大型发电机微机失步保护的研究(Study on Microprocessor-based Out-of-step Protection for Large Generator Units) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(22): 24 - 27.
- [10] 闫苏莉(YAN Su-li). 电力系统功角测量方案的研究(A Study on the Measuring Method of Power Angle in an Electric Power System) [J]. 西安石油学院学报(Journal of Xi'an Petro Institute), 1999, 14(3): 30 - 33.
- [11] 王少荣, 孙海顺, 苗世洪(WANG Shaorong, SUN Haisun, MIAO Shirong). 同步发电机功角高精度测量方法及其实现(High Precision Measurement for Rotor Angle of the Synchronous Generator and Its Implementation) [J]. 中国机械工程(China Mechanical Engineering), 1999, 10(6): 667 - 670.
- [12] 卢志刚, 等(LU Zhi-gang, et al). 电力系统相角测量和应用(Power System Phase Angle Measurement and Application) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(4): 41 - 46.
- [13] 时伯年, 崔文进, 等(SHI Bo-nian, CUI Wen-jin, et al). 基于 GPS 同步相量的电力系统暂态稳定预测控制(Power Systems Transient Stability Control Based on GPS Synchronous Phasor Measurements) [J]. 清华大学学报(Journal of Tsinghua University), 2002, 42(3): 316 - 320.
- [14] Wilson R E, et al. GPS Synchronized Power System Phase Angle Measurement [J]. International Journal of Satellite Communications, 1994, 12: 499 - 505.
- [15] Murphy R J. Disturbance Recorders Trigger Detection and Protection [J]. IEEE Computer Application in Power System, 1996, 1: 24 - 28.
- [16] Barnett R O, et al. Synchronized Phasor Measurement of a Power System Event [J]. IEEE Trans on PWRD, 1994, 9(3): 1643 - 1649.
- [17] 韩英铎, 等(HAN Ying-duo, et al). 电力系统中的三项前沿课题——柔性输电技术, 智能控制, 基于 GPS 的动态安全分析与监测系统(Three New Front Subjects in Power Systems) [J]. 清华大学学报(Journal of Tsinghua University), 1997, 37(7): 1 - 6.
- [18] 王克英, 等(WANG Ke-ying, et al). 使潮流方程直接可解的 PMU 配置方案研究(Placement of PMU for Direct Solution of Power Flow) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1999, 19(10): 14 - 16.
- [19] 李萍(LI Ping). 相量测量在电力系统稳定分析中的应用(Phasor Measurement and Its Application in Power System Stability Analysis) [D]. 北京:华北电力大学(Beijing: North China Electric Power University), 1997.
- [20] 段振国(DUAN Zhen-guo). 电力系统解列策略、故障诊断及恢复策略研究(Study of Network Decouple, Fault Diagnosis and Restoration of Power System) [D]. 北京:华北电力大学(Beijing: North China Electric Power University), 1997.
- [21] Liu C W, Thorp J. Application of Synchronized Phasor Measurements to Real-time Transient Stability Prediction [J]. IEEE Proceedings of Trans on Distribution, 1995, 142(4): 355 - 360.
- [22] 薛飞, 殷鉴, 陈允平(XUE Fei, YIN Jian, CHEN Yurping). 基于 GPS 和分群理论的华中电网暂态稳定预

- 测(The Transient Stability Forecast of Center China Power Network Based on GPS and Grouping Theory) [J]. 电力建设(Electric Power Construction), 2002, 23(5): 56 - 58.
- [23] Centeno V, Phadke A G, et al. An Adaptive Out-of-step Relay[J]. IEEE Trans on PD, 1997, 12(1): 61 - 67.
- [24] 周良松, 夏成军, 等(ZHOU Ling-song, XIA Cheng-jun, et al). 基于 PMU 的预测型振荡解列初步研究(Study on Predictive System Separation Controls Based on PMU) [J]. 继电器(Relay), 2001, 29(3): 9 - 13.
- [25] Stanton S E, Charlie S, et al. Application of Phasor Measurements and Partial Energy Analysis Instabilizing Large Disturbances[J]. IEEE Trans on PWRs, 1995, 10(1): 297 - 306.
- [26] Steven R, Stein K, Thorp J, et al. Decision Trees for Real-time Transient Stability Prediction [J]. IEEE Trans on PWRs, 1999, 9(3): 1417 - 1426.
- [27] Liu C W. Application of an Oveffuzzy Neutral Network to Real Time Transient Stability Swings Prediction Based on Synchronized Phasor Measurements[J]. IEEE Trans on PWRs, 1999, 14(2): 685 - 692.
- [28] 刘玉田, 林飞(LIU Yu-tian, LIN Fei). 基于相量测量技术和模糊径向基网络的暂态稳定性预测(Application of PMU and Fuzzy Radial Basis Function Network to Power System Transient Stability Prediction) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2000, 20(2): 19 - 23.
- [29] Cubina F, Strmcnik B. Voltage Collapse Proximity in Case of a Radial Network[J]. IEEE ISCAS, 1996, 1.
- [30] 周念成, 钟岷秀, 等(ZHOU Niann-cheng, ZHONG Min-xiu, et al). 节点电压稳定性的实用判据(The Practicality Criterion of Node Voltage Stability) [J]. 重庆大学学报(Journal of Chongqing University), 1996, 19(2).
- [31] Begovic M M, Phadke A G. Voltage Stability Assessment through Measurement of Reduced State Vector [J]. IEEE Trans on PWRD, 1990, 5(1).
- [32] 周念成, 等(ZHOU Niann-cheng, et al). 基于电压相量的电力系统电压稳定指标(Voltage Stability Index in Power System Based on Voltage Phasors) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1997, 17(6): 425 - 428.
- [33] 郭强, 夏道止, 等(GUO Qiang, XIA Dao-zhi, et al). GPS 同步时钟用于电力系统非线性励磁控制(Application of GPS Synchronized Clock to Power System Nonlinear Excitation Control) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(9): 20 - 23.
- [34] 严伟, 陆于平, 李鹏(YAN Wei, LU Yu-ping, LI Peng). 基于功角直接测量及预测的发电机失步预测保护(A Study on Microprocessor Based Predictive Out-of-step Protection for Large Generator Units) [J]. 继电器(Relay), 2001, 29(3): 20 - 22.
- [35] Padiyar K R, Krishna S. On-line Detection of Loss of Synchronism Using Locally Measurable Quantities [A]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES, 2001, 1: 537 - 542.
- [36] Padiyar K R, Krishna S. Transient Stability Augmentation by Programmed Power Angle Relationship Using Unified Power Flow Controller [A]. The Seventh International Conference on AC/DC Power Transmission, 2001, (485): 244 - 249.

收稿日期: 2003-05-14; 修回日期: 2003-07-24

作者简介:

龙厚军(1979 -), 男, 硕士研究生, 从事电力系统稳定控制方面的研究;

胡志坚(1969 -), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统稳定控制、自动化方面的研究;

陈允平(1946 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护、高电压技术、电力系统稳定控制及自动化等方面的研究。

A study of power angle measurement based on GPS and application of synchronized phasor in power system

LONG Hou-jun, HU Zhi-jian, CHEN Yur-ping

(Department of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Aiming at the application of GPS technology in power system, the paper introduces the power angle measurement method, and analyses its merits and shortcomings. And also, synchronized phasor based on GPS synchronized measurement is discussed in detail. Research results have revealed its application field as follows: status estimate, stability control, out-of-step prediction and protection. In conclusion the paper points out that transient stability control theory based on synchronized phasor is still required further research and development.

Key words: power angle measurement; phasor control; transient stability; status estimate; global positioning system(GPS)