

# 发电机功角的实时计算方法

梁振光

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 简述了发电机功角的重要性,介绍了确定发电机功角的测量法和算法,提出一种基于同步相量测量的发电机功角计算模型,该方法利用机端电压、电流采样数据,简单、易于实现,有良好的模型适应性,可用于实时功角计算。通过仿真计算结果表明,该方法具有较好的精度,可满足工程要求。用于全网相量测量系统中,可准确监测功角动态变化,为系统的安全稳定监测提供了一定的基础。

关键词: 发电机; 功角; 算法; 实时

中图分类号: TM764 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)01-0012-04

## 0 引言

随着电力工业的迅猛发展,系统的容量不断增加,其安全稳定运行越来越重要。经验表明,系统运行的安全与否与其运行状态密切相关,因此,实时、全面地掌握电力系统各部分的运行状态对保证系统的安全、稳定、紧急运行具有重要的意义。发电机作为电力系统中的重要设备,其稳定运行则成为重中之重。发电机的功角不仅是反映发电机内部能量转换的一个重要参数,也是发电机稳定的一个重要标志量。功角的改变与有功功率、无功功率的变化相关联,通过监视功角的变化,为发电机在异常、故障及其失稳情况下的分析,提供了非常重要的参考依据。因此,发电机的功角是电力系统中的一个十分重要的监测量。目前,电力系统中基于GPS的电网运行实时监测系统的研究已十分活跃,本文对其中发电机功角的测量、计算<sup>[1~9]</sup>进行了研究,并提出了一种基于同步相量测量的发电机功角实时计算方法。

## 1 发电机的功角

根据电机学原理,在忽略电机电枢绕组电阻情况下,隐极发电机的有功功率和无功功率可分别表示为

$$P = \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = \frac{E_q U}{x_d} \cos \delta - \frac{U^2}{x_d} \quad (2)$$

其中,  $U$  为发电机的端电压,  $E_q$  为发电机的感应电势,  $x_d$  为发电机的同步电抗,  $\delta$  为感应电势与端电压间的相位夹角(称为发电机的功率角或功角),  $P$  为有功功率,  $Q$  为无功功率。当感应电势和电压恒

定时,传输的有功功率是功角  $\delta$  的正弦函数。

功角  $\delta$  在电力系统稳定中占据十分重要的地位,为保证发电机的静态稳定性,应使功率增量  $\Delta P$  和角度增量  $\Delta \delta$  的比值为正,即静态稳定性的判据为  $\Delta P / \Delta \delta > 0$ 。当电力系统受扰动,发电机定子磁场与转子发生相对运动,发电机的功角  $\delta$  发生变化,若功角经过振荡后能稳定在某一个数值,则表明发电机重新恢复了同步运行,系统具有瞬时稳定性;若电力系统受大扰动,发电机功角不断增大,发电机不再保持同步,则系统失去瞬时稳定。因此,可用电力系统受大扰动后功角随时间变化的特性  $\delta = f(t)$  作为瞬时稳定的判据,记录实时功角信息,显示功角的变化,对功角摆动超过设定界限进行报警,以便于及时处理可能发生的不稳定情况。

发电机的功角  $\delta$  反映发电机转子的相对运动,是判断发电机是否同步运行的依据。要确定发电机功角  $\delta$ ,有两种方法:直接测量法<sup>[1~5]</sup>; 算法<sup>[6~9]</sup>。

### 1.1 直接测量法

直接测量法是指根据功角  $\delta$  所表征的物理意义,直接测量发电机转子的位置信号,进而得到功角值。

如图1所示,功角  $\delta$  具有双重物理意义:发电机的感应电势  $E_0$  和端电压  $U$  之间的时间相角; 主极磁场  $F_f$  和气隙合成磁场  $F$  之间的空间夹角。在转子轴上确定一个固定的机械位置,如  $d$  (与  $d$  轴的相角为  $\theta$ ), 则  $d$  可间接代表了  $E_0$  的方向,  $E_0$  与  $d$  间相角差为  $\theta_0 = 90^\circ + \alpha$  ( $\alpha$  为定位相角差)。将转子上的固定位置  $d$  转化为电信号,测得  $d$  轴位置与发电机端电压  $U$  的相角差  $\beta = \theta_0 + \alpha$ , 根据已经确定的  $\theta_0$ , 就可求出发电机的功角  $\delta$ 。

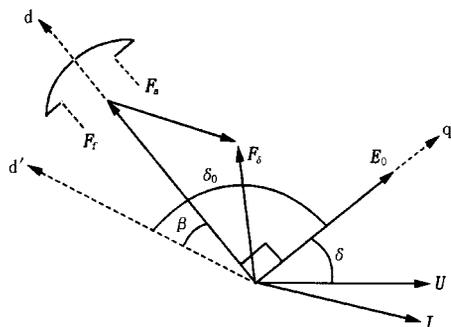


图1 直接测量功角原理

Fig. 1 Principle of direct measurement of power angle

转子位置信号的获得,可采取: 设置转子位置传感装置<sup>[1~4]</sup>,利用光电转换或磁电变换方法,得到转子位置信号; 借助于汽轮机的转速信号<sup>[5]</sup>,将其脉冲信号整形,进行60分频(转子每转一周,测速信号产生60个脉冲),输出转子位置信号。

定位相角  $\delta_0$  的确定,可采取: 以发电机电流  $I=0$  时(此时功角  $\delta=0$ ),测量的 d 轴与端电压  $U$  的相角差  $\delta_0$  确定<sup>[1~4]</sup>; 在稳态情况下,由功角的计算值确定其定位角<sup>[5]</sup>。

直接测量法可以测量得到功角  $\delta$ ,但需要装设转子位置传感装置,并在机组投运时校正功角的初相角,实现起来比较复杂。且传感器存在机械加工偏差、安装偏差,电磁干扰、机械振动等也会引起误差。

### 1.2 算法

发电机稳态运行时,其电压方程为:

$$E_q = U + I_r + j I_d x_d + j I_q x_q \quad (3)$$

其中,  $E_q$  为发电机的 q 轴感应电势,  $U$  为发电机的端电压,  $I_d$ 、 $I_q$  为发电机定子电流的 d、q 轴分量,  $x_d$ 、 $x_q$  为发电机 d、q 轴同步电抗。

忽略定子电阻的影响,由发电机的相量关系,可得功角  $\delta$  的计算公式为:

$$\delta = \arctan \frac{I x_q \cos \delta}{U + I x_q \sin \delta} \quad (4)$$

对于确定的系统,  $x_q$  为常数,因此,根据实时测量得到的发电机的端电压  $U$ 、电枢电流  $I$  及其夹角  $\delta$ ,便可由式(4)计算出其功角  $\delta$ 。

算法是指根据发电机的数学模型和内部参数,并利用测量得到的发电机的电压相量和电流相量,计算发电机的感应电势  $E$  和功角  $\delta$ 。

算法确定功角  $\delta$ ,不需要装设位置传感装置,以及初始功角校正,具有简单、易于实现、经济实用的优点。但目前的功角计算方法<sup>[6~9]</sup>都是基于发电机的稳态模型,在稳态时具有良好的测量精度,而在

暂态过程中,误差则难以控制。为保证暂态过程的计算精度,需要建立发电机的暂态模型,计算其功角。

## 2 基于同步相量测量的功角实时计算方法

为计算发电机在暂态过程中的功角,本文建立了发电机功角的暂态模型,并根据同步相量测量结果,进行计算。

设同步发电机有三个定子绕组(a,b,c)、一个励磁绕组(f)和两个阻尼绕组(D,Q),根据同步电机理论,列出描述电磁瞬态过程的派克(Park)方程。假设定子三相绕组对称,气隙中磁通按正弦规律分布,忽略饱和的影响,将三相绕组的同步电机转化为 d、q 两轴绕组的等值电机,如图 2 所示。其中 q 轴方向有定子绕组(q 绕组)和阻尼绕组(Q 绕组),d 轴方向有定子绕组(d 绕组),励磁绕组(f 绕组)和阻尼绕组(D 绕组)。

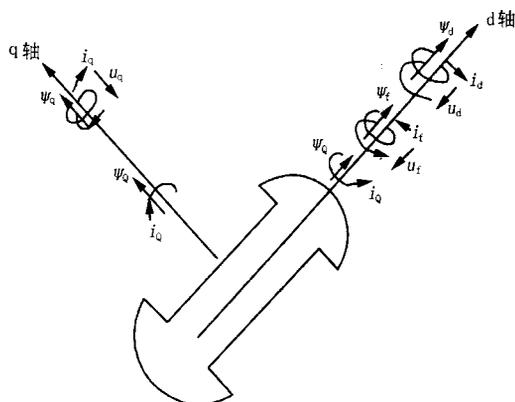


图2 同步电机 d、q 模型

Fig. 2 d, q models of synchronous electric machine

按照图 2 中规定的坐标系统和各物理量正方向,可写出标么值系统下的派克方程为

$$\begin{cases} u_d = p \psi_d - r i_d \\ u_q = p \psi_q + r i_q \\ u_f = p \psi_f + r_f i_f \\ u_D = p \psi_D + r_D i_D = 0 \\ u_Q = p \psi_Q + r_Q i_Q = 0 \end{cases} \quad (5)$$

磁链表达式为:

$$\begin{cases} \psi_d = -x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_D \\ \psi_q = -x_q i_q + x_{aq} i_Q \\ \psi_f = -x_{ad} i_d + x_f i_f + x_{ad} i_D \\ \psi_D = -x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_D i_D \\ \psi_Q = -x_{aq} i_q + x_Q i_Q \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $x_d, x_q, x_D, x_Q, x_f$  分别为定子 d、q 轴绕组、转子 D、Q 阻尼绕组和励磁绕组磁链,  $x_d, x_q, x_D, x_Q, x_f$  分别为定子 d、q 轴绕组, 转子 D、Q 阻尼绕组和励磁绕组自感抗 ( $x_d, x_q$  也称 d、q 轴同步电抗),  $x_{ad}$  为 d 轴上三个绕组 (d, f, D) 之间的互感抗, 又称 d 轴电枢反应同步电抗,  $x_{aq}$  为 q 轴上两个绕组 (q, D) 之间的互感抗, 又称 q 轴电枢反应同步电抗,  $r, r_f, r_D, r_Q$  分别为定子绕组、励磁绕组、D 轴阻尼绕组和 Q 轴阻尼绕组的电阻。  $p = \frac{d}{dt}$  为微分操作符,  $t$  为标么时间。

在系统受到扰动, 研究其暂态稳定时, 做如下假定:

(1) 忽略突然发生故障后网络中的非周期分量电流。

因为一方面非周期分量衰减很快; 另一方面, 此非周期分量电流产生的磁场在空间不动, 它和转子绕组电流产生的磁场相互作用将产生以同步频率交变、平均值接近于零的制动转矩, 对发电机的机电暂态过程影响不大。

(2) 只计及正序分量, 忽略负序、零序分量的影响。

当故障为不对称故障时, 发电机定子回路中将流过负序电流。负序电流产生的磁场和转子绕组电流的磁场形成的转矩, 是两倍频率交变、平均值接近于零的制动转矩, 对发电机的机电暂态过程没有明显影响, 可以忽略不计。如果发电机中流过零序电流, 由于它在转子空间的合成磁场为零, 它不产生转矩, 也完全可以忽略。

发电机的功角  $\delta$  是  $E$ 、 $U$  之间的夹角, 与电压的直轴、交轴分量相关, 要计算发电机的功角, 只要能确定电压的这两个分量即可, 而不必非求出  $E$  的大小。基于 GPS 的同步相量测量, 可提供准确的电压、电流相量信息, 据此信息结合发电机的功角模型可准确计算发电机的功角。为此, 根据公式 (5) 的第一、二、五式, 公式 (6) 的第二、五式, 功角与角频率的关系可得:

$$\begin{cases} u_d = p \delta - x_q i_q - r i_d \\ u_q = p \delta + x_d i_d - r i_q \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} u_Q = p \delta + r_Q i_Q = 0 \\ i_q = -x_q i_Q + x_{aq} i_Q \\ i_Q = -x_{aq} i_q + x_Q i_Q \end{cases} \quad (8)$$

$$= 1 + \frac{d}{dt} \quad (9)$$

将式 (7)、(8) 和 (9) 联立, 即可构成基于定子电

压、电流相量信息的发电机功角计算模型。  $U, I, \delta$  为三个已知量, 方程组中有六个未知量 ( $i_d, i_q, i_Q, i_Q, \delta, \dot{\delta}$ )、四个微分方程和两个代数方程, 可以求出未知量的解, 即求出发电机的功角。

此模型完全根据电机的电压、电流测量值及电机参数, 不必考虑发电机的励磁变化和转子机械方程, 也不受电网参数的影响, 因而具有很好的模型适应性。计算结果的准确性主要受测量电压、电流相量值和电机参数值精度的影响。

在小干扰情况下, 转速摆动不大,  $\dot{\delta} \approx 1$  (标么值), 由式 (7)、(8) 即可确定功角。

### 3 模型的仿真计算

为验证上述功角计算模型, 以 MATLAB 对单机无穷大电网系统的暂态过程进行仿真。仿真模型中发电机通过一台变压器接入电网, 发电机的参数为  $x_d = 1.305, x_d' = 0.296, x_d'' = 0.252, x_q = 1.305, x_q' = 0.243, x_q'' = 0.18, T_d = 1.01, T_d' = 0.053, T_{q0} = 0.05$ , 变压器的短路电抗  $x_k = 0.08$ 。在 0 s 时刻开始仿真, 0.1 s 时刻电网侧发生三相短路, 0.2 s 时刻故障切除。

以仿真结果中的电压、电流数据, 根据功角的稳态模型和上述模型分别进行计算, 结果如图 3 和图 4 所示。由图可知, 在暂态过程中, 功角的暂态模型计算结果与仿真结果基本一致, 可以满足工程要求; 而功角的稳态模型计算结果与仿真结果相比有较大误差。

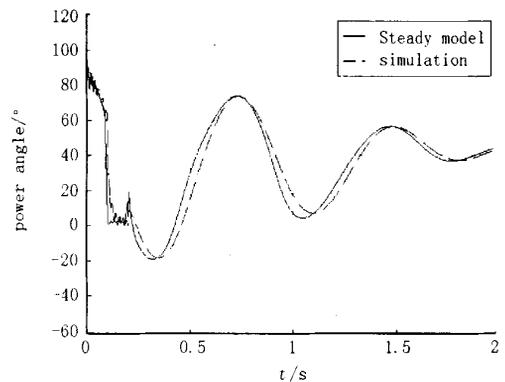


图 3 发电机功角稳态模型的计算结果

Fig. 3 Calculation results of generator power angle by using steady model

对于暂态模型计算的功角结果, 从图 4 可以看出, 在三相短路故障时, 功角计算结果与仿真结果有一定差别, 而在故障切除后的过渡过程中差别很小。实际上, 三相短路故障时功角计算结果与仿真结果

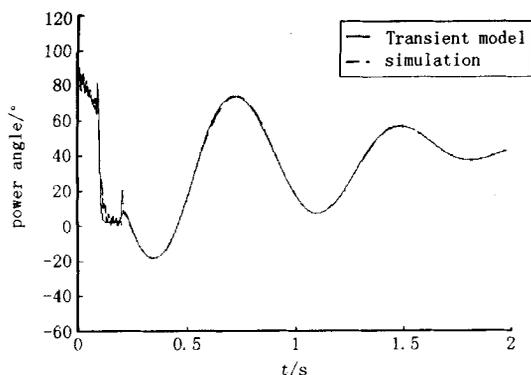


图4 发电机功角暂态模型的计算结果

Fig. 4 Calculation results of generator power angle by using transient model

的变化轨迹是一致的,但仿真结果存在周期性的波动,而计算结果则平稳变化。这是由于三相短路过程中绕组电压、电流出现非周期分量,相应地,功角存在周期分量;而本文方法计算功角时,只计及电压、电流的正序基波分量,忽略了其它分量,相应地,功角计算结果中只包含非周期分量。通常,功角监测用于系统的稳定,此时,可只考虑功角的非周期分量的变化情况,对周期分量可不作考虑,且随着暂态分量的衰减,计算结果和实际值趋于一致。

采用本文方法计算时,计算步长的选择也会影响功角结果。由于发电机转子的机械惯性较大,功角变化缓慢,功角计算的步长取  $T/12$  和  $T$  (工频周期) 时的结果差别非常细微,步长取  $5T$  时结果略有差别,当取  $10T$  时功角存在较大误差。功角误差较大是因为计算步长较大时,每一步的功角变化较大,微分方程的解与连续变化的真实值有误差,且步长大会遗漏变化过程中的详细信息。应当注意,即使以  $T$  步长计算功角,仍需以较高的采样频率测量电压、电流,以期得到准确的电压、电流相量信息。

功角计算时,发电机电压、电流的测量误差也会引起功角误差,但一般测量结果的精度较高,且通常计算功角时不是将电压、电流测量值直接代入,而是通过对电压、电流进行傅氏变换,求出正序基波分量,再用于功角计算,因而,测量结果中随机误差的影响可以得到较好的抑制。

#### 4 结语

本文提出的功角计算方法,利用发电机的数学模型和机端电压、电流相量信息,解决了暂态过程中的功角计算问题,避免了直接测量法中位置传感器带来的不便,可方便地用于基于 GPS 的同步相量测

量系统中实时确定发电机的功角,实现功角及电网安全、稳定的动态监测。

#### 参考文献:

- [1] 金基圣,南德哲,姜佰峰,等(JIN Ji - sheng, NAN De - zhe, JIANG Bai - feng, et al). 电网动态稳定实时监测系统(Real - time Dynamic Stability Supervision System for Electric Power Network) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(10): 17 - 19.
- [2] 董清,单波,郝玉山,等(DONG Qing, SHAN Bo, HAO Yu - shan, 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).
- [3] 董清,单波,侯子利,等(DONG Qing, SHAN Bo, HOU Zi - li, et al). 同步发电机功角转速测量装置(The Device for Measuring Power Angle and Rotator Speed of Synchro - generator) [J]. 华北电力大学学报(Journal of North China Electric Power University), 1999, 26(3): 7 - 10.
- [4] 王少荣,孙海顺,苗世洪,等(WANG Shao - rong, SUN Hai - shun, MIAO Shi - hong, et al). 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).
- [5] 严登俊,鞠平,吴峰,等(YAN Deng - jun, JU Ping, WU Feng, 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.
- [6] 曲和南,王少荣(QU He - nan, WANG Shao - rong). 同步发电机运行变量的在线算法研究(A Research on Real - time Algorithm for Determining Operating Variables of Synchronous Generators in Power System) [J]. 华北电力学院学报(Journal of North China Institute of Electric Power), 1990, 17(2): 23 - 31.
- [7] 王彬业,蒋桂香,王颖,等(WANG Bin - ye, JIANG Gui - xiang, WANG Ying, et al). 发电机功角的计算及应用(Calculation and Application of Generator Power Angle) [J]. 继电器(Relay), 2000, 28(5): 28 - 29.
- [8] 刘素英,梁军,李欣唐,等(LIU Su - ying, LIANG Jun, LI Xin - tang, et al). 发电机功角微机测量及其应用(Microcomputer Measurement for the Generators Rotor Angle and its Application) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1993, 17(10): 42 - 46.

(下转第 42 页 continued on page 42)

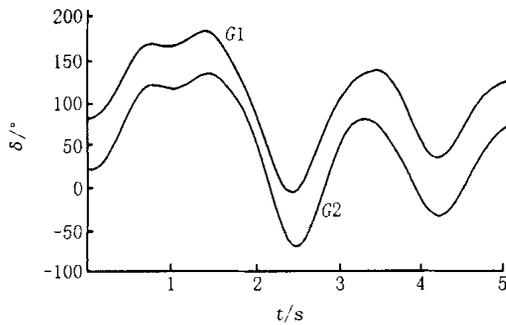


图5  $P_{ETW} = 1.1P$ , 故障切渭河两台机功角曲线

ig.5  $P_{ETW} = 1.1P$ , -  $t$  curve with two generators tripped

#### 4 结语

在电网结构不变时,通过采取电网紧急情况下的控制措施能够提高电网的稳定水平。本例所采取的控制措施,实际上是在机组加速时,减少机组的加速功率,从而提高稳定水平,因此,稳定水平的提高与切除机组的时间及功率有关,切除时间越短越好,切除功率越大越好。西北电网采用分布式稳定控制

装置,能在三条联络线故障时,提高东电西送稳定水平约10%。

#### 参考文献:

- [1] Kundur. 电力系统稳定与控制 (Stability and Control of Power System) [M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2002.
- [2] 电科院 (China Electric Power Research). 电力系统分析综合程序用户手册 (User's Manual for Comprehensive Procedure of Power Systems Analysis) [Z]. 电力科学研究院 (China Electric Power Research Institute), 2000.

收稿日期: 2003-03-24; 修回日期: 2003-05-29;

作者简介:

范越(1970-),男,西北电力调度中心运行方式处专工,研究方向为电力系统稳定控制;

段来越(1965-),男,西北电力调度中心副主任,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统稳定控制;

史可琴(1963-),女,西北电力调度中心运行方式副处长,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统稳定控制。

### Application of distributed transient stability control device in northwest power grid

FAN Yue, DUAN Lai-yue, SHI Ke-qin, SHANG Yong, LI Yan, YU Zheng

(Dispatching and Communication Center of Northwest Electric Power Company, Xi'an 710004, China)

**Abstract:** To respond to the fault of three important interconnected transmission lines of northwest power grid, a distributed transient stability control device is adopted to increase the transient stability level. Stability calculation demonstrates that the transient stability level increases by 10 percent in case of the fault of three important interconnected transmission lines when the above mentioned stability control is employed.

**Key words:** stability control; stability calculation; fault of interconnected transmission line

(上接第15页 continued from page 15)

- [9] 汪建,代仕勇(WANG Jian, DAI Shi-yong). 发电机功角的微机测量系统(The Generator Power Angle Measurement System based on Microcomputer) [J]. 仪表与仪表(Instrument and Apparatus), 2001, (4): 17-18.

收稿日期: 2003-04-28; 修回日期: 2003-07-21

作者简介:

梁振光(1967-),男,博士,副教授,主要从事电力系统稳定分析、电机理论、工程电磁场数值分析等方面的研究。

### Real-time calculation method of generator power angle

LIANG Zhen-guang

(Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** The importance of generator power angle is described briefly. Measurement method and calculation method to determine generator power angle are introduced. A generator power angle calculation model based on synchronous phasor measurement is presented. It makes use of generator's sampling data of voltage and current. The method is simple to master, easy to realize, and good to model adaptability, which can be used in real-time power angle calculation. Simulation results reveal that the method has fine accuracy while meeting engineering demand. When the method is used in whole net phasor measurement systems, dynamic variations of power angle can be monitored accurately. It lays a foundation for the safety and stability monitoring of system.

**Key words:** generator; power angle; algorithm; real-time