

发电机功角 δ 表述的拓展及应用

发电机功角 δ 是电力系统机组稳定运行中的一个重要技术参数，阐述了发电机功角 δ 另一种表达方式，为工程应用中的简化计算及智能仪表的实时采样和数据显示提供了理论依据。

郑祖平/上海交通大学电子信息与电气工程学院

0 引言

发电机功角 δ 在电力系统机组稳定运行研究中起着十分关键的作用，它除了表示我们常规所理解的发电机电势和发电机电压之间的夹角 δ 之外，还可表示发电机此刻的运行工况，即发电机此时输出的有功 P 、无功 Q 及电压 U 的状态。在发电机正常运行状态下，原动机的机械输入功率与发电机的电磁输出功率保持平衡，此时发电机电势 E_q 与机端电压 U 以相同的频率旋转；当原动机的机械输入功率增加时，原动机的机械输入功率大于发电机的电磁输出功率，发电机转子将加速，发电机转子转速有上升的趋势。但由于发电机处在并网运行状态，受电网的约束，此时发电机的频率 F_g 就是电网频率 F_s ，其电势 E_q 相量相对于机端电压 U 相量将产生相对角位移 $\Delta\delta$ ，对发电机转子产生微量加速。其具体表征就是功角 δ 增大，同时向电网输出有功 P ，直到在电网制动功率的制约下达到新的平衡。

整个变化过程如图1所示。

由于发电机电势是包含同步电抗 X_d 在内的机组内压降 IX_d 与机端电压 U 向量合成的电气参数，无法直接测量，只能通过间接计算得出。若想得到功角参数 δ ，通常采用功角仪测量。因而多功能仪

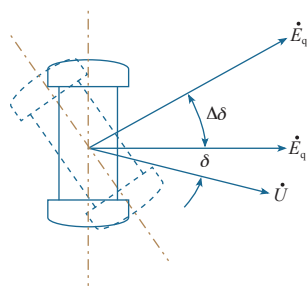


图1 发电机转子功角的变化

表不包括功角，给推广应用带来不便。经过长期的实验观察发现，当改变有功 P 、无功 Q 及电压 U 三者中的任意一个量，功角 δ 都会发生改变。为此设想能否找出三者之间的对应关系，下面通过发电机正常运行基本相量图进行推导分析。

电气工程基础发电机正常运行基本相量图如图2所示。

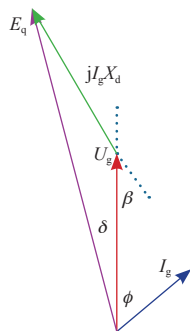


图2 发电机正常运行基本相量图

由图2可得如下关系

$$\begin{aligned}\delta &= \operatorname{tg}^{-1}[(I_g X_d \cos \varphi) / (U_g + I_g X_d \sin \varphi)] \\ \operatorname{tg} \delta &= \frac{I_g X_d \cos \varphi}{U_g + I_g X_d \sin \varphi} = \frac{\sqrt{3} U I X_d \cos \varphi}{\sqrt{3} U (U / \sqrt{3} + I X_d \sin \varphi)} \\ \operatorname{tg} \delta &= \frac{P X_d}{U^2 + Q X_d} \\ \operatorname{tg} \delta &= \frac{P}{Q + \frac{U^2}{X_d}}\end{aligned}\quad (1)$$

关键词/Keywords

功角 δ ·

矢量图·

式中, U 为机组线电压; I 为机组线电流; U_g 为机组相电压; I_g 为机组相电流; P 及 Q 分别为机组的有功和无功; X_d 为发电机同步电抗当机组的运行功率(P 、 Q)及机端电压 U 确定后, 很容易就可得出对应的功角 δ 。

上述推导结论适用于隐极式发电机星形接法的前提下。

同理, 利用已有的电力系统发电机正常运行相关章节所得出的有功、无功和功角的关系亦可推出同样结论, 具体如下。

由公式 $P = (EU/X_d)\sin\delta$ 转换成

$$E = \frac{PX_d}{U \sin \delta} \quad (2)$$

由公式 $Q = (EU/X_d)\cos\delta - U^2/X_d$ 转换成

$$E = \frac{QX_d + U}{\cos \delta} \quad (3)$$

将(1)/(2)然后改写成如下关系

$$\frac{PX_d}{U \sin \delta} = \frac{QX_d + U}{\cos \delta}$$

$$\frac{PX_d}{QX_d + U^2} = \tan \delta \quad (4)$$

$$\tan \delta = \frac{P}{Q + \frac{U^2}{X_d}} \quad (5)$$

至此可以看到结论和前面相量分析所得出的结果是一致的。如此给以后的应用带来很大的便利。

从以上得到的功角表达式, 结合发电机正常运行实验中不同限制条件下, 机组运行曲线可以观察到如下变化规律:

1) 当有功 P 及电压 U 不变保持恒定, 此时调节励磁电流 I_f , 就对应出现无功 Q 与励磁电流 I_f 成正比, 功角 δ 与励磁电流 I_f 成反比的现象。

2) 当励磁电流 I_f 及电压 U 不变保持恒定, 此时调节有功 P , 就对应出现功角 δ 与有功 P 成正比, 无功 Q 与有功 P 成反比的现象。

这和由公式 $P = (EU/X_d)\sin\delta$ 及公式 $Q = (EU/X_d)\cos\delta - U^2/X_d$ 分析所得出的结论是一致的。

当发电机欠励运行到无功 Q 为负 $-U^2/X_d$ 时功角

达到 90° , 这亦和 $Q = (EU/X_d)\cos\delta - (U^2/X_d)$ 的结论相符。对于大型骨干电厂的主力发电机, 通常是处于稳定运行既有功 P 恒定, 由此可以看出对于相同容量的发电机同步电抗 X_d 越大, 机组(欠励)进相运行时允许进相无功就越小, 功角就越容易运行到 90° 。

下面以试题为例, 验证所推导的公式是否正确。

在建模及潮流校合实验中, 已知隐级发电机 $U_G^* = 1 \angle 0^\circ$ $X_d^* = 2.732 = 1 + \sqrt{3}$ 额定功率因数 $\cos\varphi = 0.866 = \sqrt{3}/2$ $I_G^* = 1$ 计算发电机运行到额定工况的功角 δ_G 及对应的电势 E_q 并作出对应的相量图。

在经过相量分析找出对应的三角关系得到如下对应关系

$$\tan \delta = \frac{IX_d \cos \varphi}{U + IX_d \sin \varphi} = \frac{1 \times (\sqrt{3} + 1) \times \frac{\sqrt{3}}{2}}{1 + 1 \times (\sqrt{3} + 1) \times \frac{1}{2}} = \frac{3 + \sqrt{3}}{2 + (\sqrt{3} + 1)} = 1$$

$$\delta = \tan^{-1}(1) = 45^\circ \quad (6)$$

电势 E_q 求取略。

若采用上面所推出的功角表达方式代入数据, 具体公司为

$$\tan \delta = \frac{P}{Q + \frac{U^2}{X_d}} = \frac{IU \cos \varphi}{UI \sin \varphi + \frac{U^2}{X_d}} = \frac{1 \times 1 \times \frac{\sqrt{3}}{2}}{1 \times 1 \times \frac{1}{2} + \frac{1}{(\sqrt{3} + 1)}}$$

$$= \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3} - 1}{(\sqrt{3} - 1) \times (\sqrt{3} + 1)}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3} - 1}{3 - 1}} = 1$$

$$\delta = \tan^{-1}(1) = 45^\circ$$

(7)

由此, 可以看出采用推导的功角表达式和采用相量分析方法最终得出的结论是一致的。

以往测量发电机功角 δ 大多采用专用的功角仪的方法来解决, 但功角仪一方面成本高投资大; 另一方面 E 电势侧取样困难。故智能仪表只显示电压 U 、电流 I 、有功 P 及无功 Q 等一些常规参数, 而无法显示功角 δ 。这就使其应用受到限制, 对于需要测量功角 δ 的场合只能另想办法。

如果采用上述新的方法既 $\tan \delta = P/[Q + (U^2/X_d)]$ 就可绕开电势 E ，则功角测量就较容易解决。编入计算机程序后就能迅速实时地显示发电机正在运行的功角，从而替代功角显示仪。因为对于一个确定的机组来说，同步电抗 X_d 作为铭牌参数通常是提供的已知参数，利用智能仪表已获取的 P 、 Q 和 U 参数，就能得出不同运行工况下的实时功角参数 δ 供运行人员参考判断，以提高发电机运行的安全性和稳定性。尤其是对机组暂态稳定研究，或静稳极限运行有很大的帮助，对机组运行监控带来进一步的完善。

相对于单独运行的机组所组成的孤立电网如岛屿发电、船舶发电及山区小水电的稳定运行，若加入功角实时监控，则将大大提高机组安全稳定运行的监测条件。

对于教模机组（容量不超过3 kV·A）或无法获得同步电抗 X_d 的其他机组，可采用以下实验方法获得，具体如下。

同步电抗 X_d 并网测量。由于教学模型同常采用标准小型化（3 kV·A以下）三相同步发电机来模拟电力系统的同步发电机机组，虽然其参数不能与大型发电机相似，但也可以看成是一种具有特殊参数的电力系统的发电机。通常同步电抗 X_d 及暂态时间常数 T_{d0} 一般不标注，而同步电抗 X_d 又是研究机组运行基本相量图不可或缺的参数，常用的方法是采用三相突然短路的实验方法测量。但教学模型同常采用标准小型化（3 kV·A以下）三相同步发电机由于机组机械构造及材料绝缘等方面的因素，通常不主张采用此方法。一旦需要用到同步电抗 X_d 方面的参数，通常只能做简化测量，故造成较大的误差。而利用同步发电机运行的固有特性，并网测量则可避免上述现象，但必须准确测量特殊点的读数，具体推导如下。

建立初始工况： $P_g = 0$ ； $Q_g = Q_0$ （为正）； $U_g = U_n$ ； $\cos \varphi = 0$ ； $I_g = I_q = I_1$ ；励磁电流为 I_f 且保持不变。

此时发电机电势

$$E_{q0} = U_g + I_g X_d = U_g + I_1 X_d \quad (8)$$

增加发电机输出的有功功率，发电机励磁保持恒定不变，若出现 $U_g < U_n$ 的情况则采取调高系

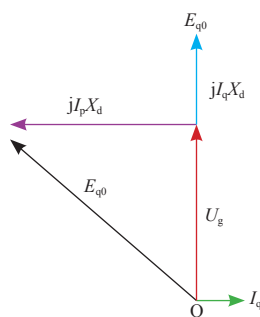


图 3

统电压 U_s 的方法来维持 $U_g = U_n$ ，直至： $Q_g = 0$ ； $\cos \varphi = 1$ ； $I_g = I_p = I_2$ ； $P_g = P_0$ ；由于励磁电流 I_f 维持恒定，故发电机电势 E_{q0} 亦相应不变。且保持如下关系

$$E_{q0} = \sqrt{U_g^2 + (I_2 + X_d)^2} \quad (9)$$

公式（8）及公式（9）合并化简最后得到发电机同步电抗的表达式

$$X_d = \frac{2U_g I_1}{I_2^2 - I_1^2} \quad (10)$$

式中， U_g 为机组相电压。

通过以上方法就可以得到同步电抗 X_d 有铭值。

以上就是本人在电力系统动模教学实践中所获得的实际经验，供大家探究，有不当之处望批评指正。

结束语

发电机功角以往需专用仪表功角仪来测量，由于受测量条件及成本的限制，大部分场合将其忽略了，但对于研究机组正常稳定运行的场合又是必不可少的。尤其当机组处于有功 P 恒定运行，当某种情况下无功 Q 处于进相运行即无功为负时，功角就会上升很快。这从新推导的功角表达式 $\tan \delta = P/[Q + (U^2/X_d)]$ 可以很容易地观察出来。当功角超过稳定极限时，机组就失去稳定，这是应尽量避免的。由于当前的电子技术发展迅猛，通过智能仪表或多功能电表已经实时获取的 P 、 Q 、 U 及预知的 X_d ，对于实时显示功角应该是不难实现的，这也达到了拓宽智能电表的应用场合，为电力系统内机组稳定运行起到了保驾护航的作用。

（收稿日期：2017-05-05） EA