

## 同步机全平面 PQ 工况图的构建及工况探讨

王亚忠, 陈国华

(广西电力职业技术学院, 广西南宁 530007)

**摘要:** 依据电路和电机理论及同步电机运行时的限制条件构建了同步电机全平面 PQ 工况图并结合全平面 PQ 工况图对发电机进相、迟相、过励磁、欠励磁; 电动机进相、迟相、过励磁、欠励磁; 调相机过励磁、欠励磁等工况进行了探讨, 最后介绍了用同步电机全平面 PQ 工况图来解释和理解抽水蓄能电站中同步电机的各种工况, 对运行人员和学生掌握同步电机运行及调节有一定参考价值。

**关键词:** 同步电机; 全平面 PQ 工况图; 进相; 迟相; 欠励磁; 过励磁; 抽水蓄能电站

## Forming of all plane PQ figure of the synchronous machine and discussion on its operating state

WANG Ya-zhong, CHEN Guo-hua

(Guangxi Electric Power Institute of Vocational and Technical Training, Nanning 530007, China)

**Abstract:** Based on the theory of circuit and electric machine, the paper introduces the forming of all plane PQ figure of the synchronous machine and the analysis of its operation state. Those operating states include the over-excited phase-lag operating state of the synchronous generator, the normal excited same-phase operating state of the synchronous generator, the lack-excited phase-advanced operating point of the synchronous generator, the zero load operating point of the synchronous generator, the lack-excited phase-lag operating point of the synchronous motor, the over-excited phase-advanced operating point of the synchronous motor, the over-excited phase-modulated operating point of the synchronous generator, and the lack-excited phase-modulated operating point of the synchronous generator. And it introduces how to use all plane PQ figure to explain different conditions of the synchronous machine in pumped storage hydro power station, it has some value for the operation person and student to master the operation and regulating of the synchronous machine.

**Key words:** synchronous machine; all plane PQ operating state figure; phase-advanced; phase-lag; lack-excited; over-excited; pumped storage hydro power station

中图分类号: TM341 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2008)18-0087-04

## 1 同步电机全平面 PQ 工况图的构建

## 1.1 参考方向、等值电路和电压方程式

如图 1 所示, 取同步电机的  $\dot{U}$ 、 $\dot{I}$  参考方向为发电机参考方向 (发电机惯例)

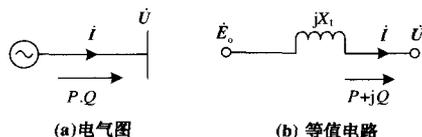


图 1 同步电机取为发电机惯例

Fig.1 Choosing the synchronous machine as generator reference direction

图 1 中,  $\dot{E}_0$  为同步电机的空载电势, 不计磁

路饱和时,  $E_0 = I_f \chi_{ad}$ ,  $I_f$  为转子励磁电流,  $\chi_{ad}$  为电机的纵轴电枢反应电抗, 上式说明同步电机的空载电势与励磁电流  $I_f$  成正比。图中的  $\chi_t$  为同步电机的等效同步电抗, 隐极机  $\chi_t = \chi_d = \chi_q$ , 凸极机  $\chi_t = \sqrt{\chi_d^2 \cos^2 \theta + \chi_q^2 \sin^2 \theta}$  ( $\theta$  为  $\dot{I}$  (或  $\dot{F}_a$ ) 与  $d$  轴的夹角, 此式笔者已在另一篇论文中作了证明)。根据图 1(b) 和基尔霍夫回路电压定律  $\sum \dot{U} = 0$ , 可写出同步电机的电压方程式:

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j\chi_t \cdot \dot{I} \quad (1)$$

## 1.2 同步发电机电压相量图和 PQ 直角坐标系

设同步发电机带感性负荷, 可作出其电压相量图如图 2 所示。

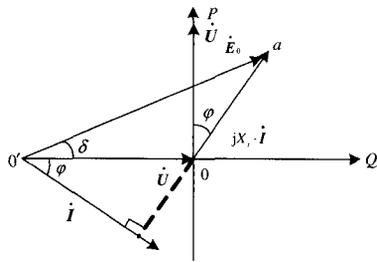


图2 发电机的电压相量图和PQ图

Fig.2 The voltage vector-diagram and PQ coordinate axis of the generator

图2中,  $\varphi$ 为 $\dot{U}$ 与 $\dot{I}$ 的夹角, 即功率因数角  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ 。  $\delta$ 为 $\dot{E}_0$ 与 $\dot{U}$ 的夹角, 即功角  $\delta = \varphi_{E_0} - \varphi_u$ 。向量 $\overrightarrow{o' o}$ 即为 $\dot{U}$ , 向量 $\overrightarrow{o a} = j\chi_1 \dot{I}$ , 其大小与定子电流 $I$ 成正比, 若视 $\overrightarrow{o a}$ 为电流 $\dot{I}$ , 即相当于 $\dot{I}$ 向前旋转了 $90^\circ$ , 作线段 $\overrightarrow{op} \perp \overrightarrow{o' o}$ , 则按发电机的参考方向来看,  $\dot{U}$ 应在 $\overrightarrow{op}$ 线段上, 从图中也可很方便的证明 $\angle aop = \angle oo'b = \varphi$ 。这样 $oa$ 线段除以 $\chi_1$ 即 $\left| \frac{oa}{\chi_1} \right|$ 在 $op$ 轴线上的投影即为 $\dot{I}$ 的有功分量 $I \cos \varphi$ , 在 $OQ$ 轴线上的投影即为 $\dot{I}$ 的无功分量, 若取 $\dot{U} = \dot{U}_N = 1 \angle 0^\circ$ , 则上述投影就分别为发电机的有功功率 $P = UI \cos \varphi = 1 \cdot I \cos \varphi$ 和无功功率 $Q = UI \sin \varphi = 1 \cdot I \sin \varphi$ 。

综上所述, 以 $O$ 点为原点的PQ直角坐标系和以 $O'$ 为起点的相量图结合在一起, 可以反映发电机电枢电流的大小( $oa$ 线段), 励磁电流的大小( $o'a$ 线段)电压与电流的相位角 $\varphi$ , 发电机的有功 $P$ 和无功 $Q$ 。

### 1.3 同步电机全平面PQ运行极限图的构建

同步发电机在正常运行中受到了以下四个条件的限制

(1) 定子电流不超过额定值  $I < I_N$ , 在P—Q

图上即为 $\left| \frac{oa}{\chi_1} \right|$ 的长度, 要求 $\left| \frac{oa}{\chi_1} \right| \leq I_N$ 。

(2) 转子励磁电流的限制,  $I_f \leq I_{fN}$ , 因为 $E_0 = k \cdot I_f$ , 故在PQ图上即为 $\overrightarrow{o'a} = E_0 \leq E_{ON} = kI_{fN}$ 。故笔者将 $\overrightarrow{o'a}$ 称为励磁线, 其长短反映出励磁电流的大小。

(3) 原动机出力的限制, 设原动机能传送给发电机的最大机械功率为 $P_{Tmax}$ , 则根据能量守恒定律应有 $P \leq P_{Tmax}$ 。

(4) 静态稳定的限制, 为了保证同步机在运行中由于励磁电流太小而与系统失去同步, 规程规定同步电机稳态正常运行时的静态稳定储备系数不小于20%, 即 $K_P = \frac{P_{max} - P_o}{P_o} \geq 20\%$ , 式中 $P_{max} = \frac{E_0 U}{\chi_1}$ ,

$P_o = P_{max} \sin \delta$ , 根据给定的 $K_P$ 值, 可计算出发电机的静态稳边界为 $\delta = 56^\circ$ 的一条斜直线。

根据图2介绍的电压相量图中各线段含义和上述发电机的四个限制条件, 还根据同步电机的可逆性原理, 可作出同步电机的全平面P-Q图如图3所示。作法如下:

① 取发电机的额定参数为基准值, 即 $\dot{U} = \dot{U}_N = 1 \angle 0^\circ$ , 设 $a$ 点为 $I = I_N$ 时的运行点, (对应 $\cos \varphi = \cos \varphi_N$ ), 以 $oa$ 为半径 $o$ 点中圆心画圆①, 为了满足定子电流的限制, 运行点只能在圆①内或圆上, 在圆内 $I < I_N$ , 在圆上 $I = I_N$ 。

② 以 $o'a$ 为半径,  $o'$ 为圆心, 画出圆②, 线段 $o'a = \chi_{ad} I_{fN} = E_{ON}$ 表示励磁电流的限制, 运行点也只能在圆②内或圆上, 在圆内时 $I_f < I_{fN}$ , 在圆上时 $I_f = I_{fN}$ 。

③ 水平线 $dc$ 表示原动机出力的限制, 即运行点只能在 $P \leq P_{Tmax}$ 之下。

④ 斜线 $o'd$ 表示发电机静态稳定的限制, 取静态稳定储备系数 $K_P = 20\%$ 时, 可求出 $\delta \leq \delta_{max} = 56^\circ$ 。斜线 $o'd$ 与 $o'd$ 含义相同。

综上所述, 在不考虑其它限制条件的情况下, 同步电机的运行点应限制在图3所示的阴影区内, 即同步电机运行点可以是各限制条件围成的封闭曲线内的任何一点。

## 2 同步电机各种工况的分析

以下讨论均假设运行点 $a$ 在上述的围线之内, 故不在画出P—Q图中的围线。

### 2.1 发电机过励磁迟相运行

如图4所示, 这时运行点在PQ图的第I象限,  $P > 0, Q > 0$ , 说明发电机在此工况下发出有功和无功, 是名符其实的有功电源和无功电源。

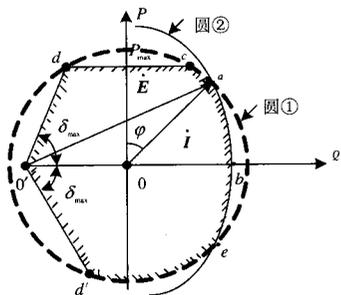


图 3 同步电机全平面 PQ 图

Fig.3 All plane PQ figure of the synchronous machine

过励磁是因为励磁电流较大(励磁线  $E_0$  线较长)。迟相是指电流  $\dot{i}$  滞后于  $\dot{U}$  (在发电机惯例下,  $\dot{U}$  与 +P 轴同向,  $\dot{i}$  即  $\vec{oa}$  向量)。

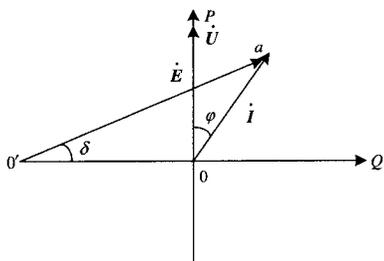


图 4 发电机过励磁迟相运行

Fig.4 The over-excited phase-lag operating point of the synchronous generator

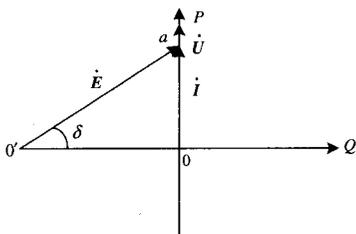


图 5 发电机正常励磁同相运行

Fig.5 The normal excited same-phase operating point of the synchronous generator

### 2.2 发电机正常励磁同相运行

如图 5 所示, 这时运行点  $a$  刚如在 +P 轴上,  $P > 0$ , 说明发电机发出有功,  $Q = 0$ ,  $\dot{U}$  与  $\dot{i}$  同相, 故电机学书上称之为正常励磁同相运行。

### 2.3 发电机欠励磁进相运行

如图 6 所示, 这时运行点  $a$  点落在 P—Q 图的第二象限,  $P > 0$  说明发出有功,  $Q < 0$  说明发电机从电网吸取无功。欠励磁是指励磁线段较短, 进相

是指  $\dot{i}$  超前于  $\dot{U}$ 。

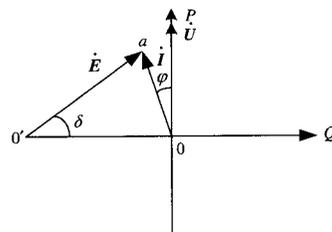


图 6 发电机欠励磁进相运行

Fig.6 The lack-excited phase-advanced operating point of the synchronous generator

### 2.4 同步发电机调相运行

如图 7、图 8 所示。其中图 7 过励磁调相  $P = 0$ ,  $Q > 0$  发出无功, 运行点  $a$  点在 +Q 轴上,  $\dot{i}$  滞后于  $\dot{U} 90^\circ$ 。

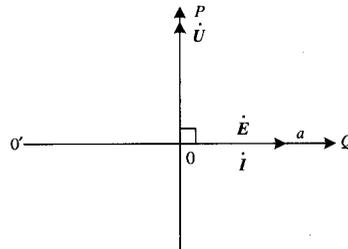


图 7 同步发电机过励磁调相运行

Fig.7 The over-excited phase-modulated operating point of the synchronous generator

图 8 中,  $P = 0$ ,  $Q < 0$ , 发电机此时从系统吸收无功, 运行点  $a$  在 -Q 轴上,  $\dot{i}$  超前于  $\dot{U} 90^\circ$ 。

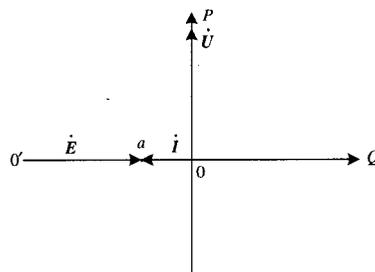


图 8 同步发电机欠励磁调相运行

Fig.8 The lack-excited phase-modulated operating point of the synchronous generator

### 2.5 同步发电机正常励磁空载运行

如图 9 所示, 此时  $a$  点与  $o$  点重合,  $\dot{i} = 0$ ,

$$P=0, Q=0, \dot{E}_o = \dot{U}$$

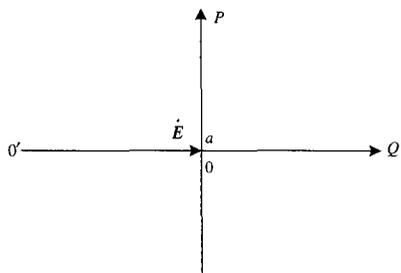


图9 发电机空载运行

Fig.9 The zero load operating point of the synchronous generator

### 2.6 电动机欠励磁迟相运行

如图10所示,运行点a落在P—Q图的第III象限,  $P < 0, Q < 0$ , 说明电机吸收有功和无功。欠励磁是因为励磁线  $E_o$  线比较短, 迟相是因为按电动机惯例  $i$  滞后于  $\dot{U}'$  ( $\dot{U}' = -\dot{U}$ , 则  $\dot{U}'$  与  $i$  之间为电动机的参考方向)。

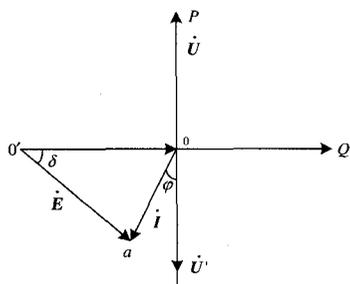


图10 电动机欠励磁迟相运行

Fig.10 The lack-excited phase-lag operating point of the synchronous motor

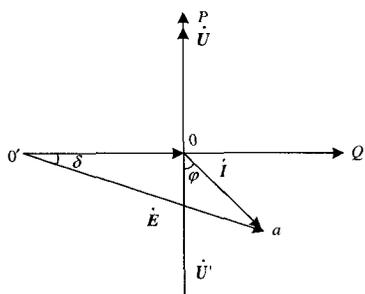


图11 电动机过励磁迟相运行

Fig.11 The over-excited phase-advanced operating point of the synchronous motor

### 2.7 电动机过励磁进相运行

如图11所示,运行点a落在P—Q图的第VI象限,  $P < 0, Q > 0$  发出无功,  $E_o$  较大故称

为过励磁,  $i$  超前于  $\dot{U}'$  故称为电动机进相。

综上所述可以看出: ①同步电机欠励磁可以吸收无功功率, 过励磁可以发出无功功率, 故调节励磁电流的大小, 就可以改变同步电机输出或输入的无功功率。②发电机进相、迟相、同相之说系指按发电机惯例下,  $\dot{U}$  和  $i$  的相位关系,  $i$  超前于  $\dot{U}$  为进相,  $i$  滞后于  $\dot{U}$  为迟相,  $i$  与  $\dot{U}$  同相即为正常励磁同相。③电动机进相、迟相、同相之说是按电动机惯例下,  $\dot{U}'$  与  $i$  的相位关系 ( $\dot{U}' = -\dot{U}$ ),  $i$  超前于  $\dot{U}'$  称为电动机进相,  $i$  滞后于  $\dot{U}'$  称为电动机迟相,  $i$  与  $\dot{U}$  同相则称为电动机正常励磁同相运行。

### 3 结束语

用同步电机全平面 PQ 工况图来解释和理解抽水蓄能电站中同步电机的各种工况, 会感到十分简明, 无论三机串联式(即电动发电机, 与水轮机、水泵连结在一个直轴上)或二机可逆式(一台水泵水轮机和一台电动发电机联结)的抽水蓄能电站中的同步电机, 其工作点可以是全平面 PQ 工况图围线内的任意一点, 在 PQ 工况图的第 I、第 II 象限, 为水轮机发电工况, 在 PQ 工况图的第 III、第 IV 象限为水泵抽水电动工况, 在 PQ 工况图的 Q 轴上为调相运行。需要注意的是全平面 PQ 工况图围线从理论上分析是可行的, 但由于发电机的类型、结构、冷却方式及容量有很大的差异, 发电机的电气主接线各异, 发电机和系统连接的紧密程度不同等原因, 在进相运行时容许发出多少有功功率和吸收多少无功功率, 理论上的计算由于不考虑发电机的饱和及励磁方式的影响等, 其结果是近似的, 一般要通过运行试验来决定。本文根据 PQ 图的四个象限和两根坐标轴给出的同步电机作发电、电动、调相、进相、迟相、同相、过励磁、欠励磁、正常励磁的形象组合定义, 对运行人员和学生掌握同步电机运行及调节有一定参考价值。

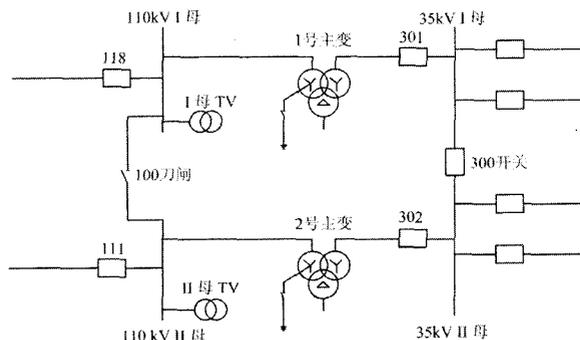
### 参考文献

[1] 王维俭. 电气主设备保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
WANG Wei-jian. The Theory and Application of Electric Main Equipment Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.  
[2] 王锡凡, 方万良, 杜正春, 等. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

(下转第 95 页 continued on page 95)

1) 更换了伏安特性较好的电压互感器, 从而改变线路参数, 破坏谐振的条件。

2) 改变运行方式, 采用一线一变的运行方式如图 3, 同时应考虑一台变压器带 2 段母线且不过负荷或者安装主变切负荷装置, 在低压侧安装自投装置, 采用两台主变低压侧运行, 备用 300 开关的运行方式。若上述故障再次发生, 一台主变退出运行, 备自投装置动作将 300 开关投入, 此时可保证不失去负荷, 从概率上来讲可以大大提高供电可靠性。



110 kV I 母: 1#主变, 1#主变中性点刀闸在分。

110 kV II 母: 2#主变, 2#主变中性点刀闸在分。

100 母联刀闸在分。

300 母联开关在分。

118 线路运行。

111 线路运行。

图 3 110 kV 变电站系统联接图

Fig.3 Wiring diagram of 110 kV transformer substation system

3) 根据 DL/T 684-1999 《大型发电机变压器继电保护整定导则》中性点可能接地或不接地运行

变压器的接地保护, 在电网发生单相接地, 中性点接地的变压器已全部断开的情况下, 零序过电压保护不需要再与其他接地保护相配合, 整定计算部门研究将零序电压整定时间延长至 0.5 s, 以躲过电动机反电动势等原因引起的暂态过电压时间。以此避免类似事故的发生。

## 4 结论

合理的电网结构是电力系统稳定运行的基础, 继电保护装置能否发挥积极作用, 与电网结构及一次设备的布置是否合理有密切的关系, 必须把它们作为一个有机整体, 统筹考虑, 全面安排。对严重影响继电保护装置对保证电力系统安全运行发挥作用的电网结构、一次设备布置及厂站主接线等, 应加以限制使用。

## 参考文献

- [1] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规定汇编 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [2] 王梅义, 等. 大电网系统技术 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995
- [3] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护典型故障分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [4] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

收稿日期: 2008-04-08; 修回日期: 2008-05-13

作者简介:

许涛 (1980-), 男, 助工, 从事继电保护工作。

E-mail: xutao@cgy.nx.sgcc.com.cn

(上接第 90 页 continued from page 90)

WANG Xi-fan, FANG Wan-liang, DU Zheng-chun, et al. Analysis of Modern Power System [M]. Beijing: Science Press, 2003.

- [3] 王梅义. 电网继电保护应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

WANG Mei-yi. Application of Protective Relaying in Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

收稿日期: 2008-03-11; 修回日期: 2008-04-28

作者简介:

王亚忠 (1959-), 男, 副教授, 主要从事电力职业技术教育和电力系统研究; E-mail: wangyz1959@126.com

陈国华 (1956-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事电力职业技术教育和电力系统研究。