

交流励磁变速发电机的原理与应用

徐锦才

(水利部农村电气化研究所 杭州 310012)

TM340.1

TM312

摘要 概述国内外有关交流励磁发电技术的研究情况,分析交流励磁发电机的控制原理及其不同于传统同步发电机的控制特性,即可以通过调节励磁来独立调节发电机的有功与无功。分析表明,交流励磁发电机具有许多传统同步发电机不具备的优点:通过改变励磁电流的幅度,可以调节机组发出或吸取的无功分量,以适应功率因数的调整,特别是可以深吸无功稳定运行;通过改变励磁电流的相位,可以快速完成发电状态的电磁调节过程,从而保证发电机电压或无功的快速调节;通过改变励磁电流的频率,可以适应发电机转速的变化,使其与原动机的最佳转速匹配,提高机组的效率,并显著提高电力系统的静态和暂态稳定性。三相交流励磁变速发电机在水电站具有广泛的应用前景。

关键词 交流励磁;变速发电机;效率 原理、水电站

随着水电站,特别是抽水蓄能电站的发展,水轮机的振动、空蚀、泥沙磨损以及运行效率问题越来越受重视。为提高水轮机的运行效率,增加系统的稳定裕度,需让水轮机组变速运行。为此,国内外都在寻找经济、有效的方法。三相交流励磁发电技术是解决以上问题的有效方法。

1 国内外交流励磁发电技术的研究概况

早在 1935 年,德国工程师 Tuxen 提出发电机采用双轴励磁。1962 年,土耳其伊斯坦布尔工业大学的 Hamdi-Sepen 在国际大电网会议上发表了《提高交流输电系统的暂态功率极限的方法》一文,揭开了近代双轴机研究的序幕,其出发点主要是提高暂态稳定性。方法是:发电机转子采用两相励磁绕组,用分段投入控制方式,即机组正常运行时,q 轴励磁绕组开路,当系统发生暂态故障时,投入 q 轴励磁电压,拉回功角,提高系统的暂态稳定性。随着高电压、长距离输电线路的无功过剩问题的出现,1964 年 Botunnick 的《同步机的异步运行》提出了双轴机同频异步运行原理:发电机转速不同于同步转速,但其合成励磁电势 E 与系统电压仍保持同步。到 70 年代,国际上研究双轴机的论文明显增多,研究表明:双轴机不管 2 个绕组成 60° 还是 90° 都有很强的进相运行能力。但是,由于没有解决双轴机转子电流的平衡,使得以往的双轴机无法在工业中运行。前苏联的电力工作者首先提出了异步化控制原

理,解决了以往双轴机的转子二相励磁电流不等的问题,于 60 年代投运了 2 台 $50\text{MV}\cdot\text{A}$ 的异步化水轮发电机,1985 年又成功地投运了 200 MW 异步化汽轮发电机,运行情况表明:异步化同步发电机能深吸无功运行,并可以通过有功无功独立调节,提高电力系统的稳定性。

随着大功率器件与微电子技术的发展,转子采用三相交流励磁方式越来越受到重视,用于电动运行就是通常所称的双馈电机^[1]。日本从 80 年代开始研究三相交流励磁发电技术,并在飞轮蓄能与抽水蓄能电站的应用方面取得了成功。日立-关西电力公司合作,于 1987 年投运了世界上第一台变速发电电动机(22 MW),并在 1993 年投运了 400 MW 的可变速抽水蓄能电站(转子采用 4 滑环三相交流励磁)。东芝-东京电力公司合作,于 1990 年投运了 80 MW 的变速发电机组,并研制成功了 300 MW 的变速机组(转子采用 6 滑环三相交流励磁)。高见电站、冲绳发电站与东京电力蛇尾川电站都相继采用了三相交流励磁发电技术,运行表明:通过水轮机变速运行可以提高水轮机的运行效率,增加水泵运行工况下的自动调频能力,并通过有功、无功的快速调节可以提高系统的稳定性^[2]。

我国对交流励磁(包括二相、三相励磁)发电技术的研究刚刚起步,由于国外对此技术的保密,使得研究工作遇到不少困难,但是,由于交流励磁发电技术是解决现代电网系统中许多问题的有效手段,所

以越来越引起国内电力工作者的重视^[3]。

2 交流励磁发电机的控制原理

交流励磁发电机的定子与传统同步发电机相同,而转子有二相或三相励磁绕组对称分布,励磁系统可以提供二相直流或三相交流。当励磁系统发生故障时,可以短接转子的交流励磁绕组,使之运行于异步发电状态^[4]。

根据坐标变化关系可知:无论转子是一相、二相还是三相励磁,都可以用二相互垂直的分量来等效,为了便于分析,选用 M - T 坐标系,如图 1 所示。

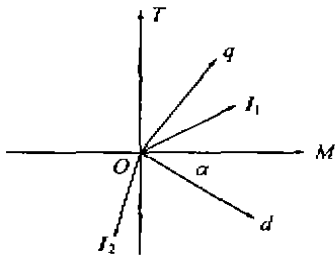


图 1 M - T 坐标系下的矢量图

I_1 : 定子电流合成矢量; I_2 : 转子电流合成矢量; M - T : 以定子磁通定向的坐标系; d - q : 以转子旋转的坐标系

在 M - T 坐标系中,可以推导得:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= U_{M1} \cdot I_{M1} + U_{T1} \cdot I_{T1} \\ Q_1 &= U_{M1} \cdot I_{T1} - U_{T1} \cdot I_{M1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

又 $I_{M1} + I_{M2} = \Psi_0 / L_m$ (L_m 为定转子间的互感抗)

$$\begin{aligned} I_{T1} + I_{T2} &= -I_{d1} \cdot \sin \alpha + I_{q1} \cdot \cos \alpha - \\ &\quad I_{d2} \cdot \sin \alpha + I_{q2} \cdot \cos \alpha \\ &= -(I_{d1} + I_{d2}) \cdot \sin \alpha + \\ &\quad (I_{q1} + I_{q2}) \cdot \cos \alpha \\ &= -[(I_{M1} + I_{M2}) \cos \alpha] \sin \alpha + \\ &\quad [(I_{M1} + I_{M2}) \sin \alpha] \cos \alpha \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: I_{M1} , I_{T1} , I_{d1} , I_{q1} 为 I_1 的各分量; I_{M2} , I_{T2} , I_{d2} , I_{q2} 为 I_2 的各分量; Ψ_0 为气隙磁通。

对于单机-无穷大电网系统,稳态运行时有:

$U_{M1} \approx 0$, $U_{T1} = U$ (电网电压), 且气隙磁通 Ψ_0 不变。

由以上关系式可得:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= -U \cdot I_{T2} \\ Q_1 &= U \cdot I_{M2} - U \cdot \Psi_0 / L_m \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

可见,发电机有功功率 P_1 与 I_{T2} 成正比,无功功率 Q_1 与 I_{M2} 成正比。

以上关系式同样适用于传统的同步发电机,只是由于传统的同步发电机只有一相直流励磁电流, I_{T2} 与 I_{M2} 无法独立调节,即有功功率与无功功率无

法独立调节,这样,传统的同步发电机稳态运行时,只能让转子运行于同步转速,并且,受静态稳定极限的约束,无法进入深吸无功运行状态。而交流励磁发电机通过交-交变频装置或 GTO-PWM 变频装置励磁,有二相或三相励磁电流,其合成矢量 I_2 的幅值、相位甚至频率都可调,这样, I_{T2} , I_{M2} 可以独立调节,即可以通过调节励磁来独立调节有功功率 P_1 与无功功率 Q_1 ,因此,交流励磁发电机具有以下传统同步发电机不具备的优点:

a. 改变励磁电流的幅度,可以调节机组发出或吸取的无功分量,以适应功率因数的调整,特别是可以深吸无功稳定运行。

b. 改变励磁电流的相位,可以快速完成发电状态的电磁调节过程,从而保证发电机电压或无功的快速调节。

c. 改变励磁电流的频率,可以适应发电机转速的变化,使其与原动机的最佳转速匹配,提高机组的效率。

d. 交流励磁发电机有功、无功的独立调节能力,将显著提高电力系统的静态和暂态稳定性。

3 交流励磁变速发电机的应用

常规水轮发电机组只能在额定同步转速下运行,机组转速固定不变,因此,水轮机的运行工况单值地决定于水头和负荷,无调节余地。常规水轮机都设计成在加权平均水头时,达到最优单位转速 n_{10}' 。水轮机运行在最优单位转速附近具有良好的性能和较高的效率,水轮机单位转速为

$$n_1 = nD_1 / \sqrt{H} \quad (4)$$

式中: D_1 为转轮名义直径。

当水头变化时,水轮机单位转速也随之变化,而偏离最优单位转速;这时水轮机效率降低,空蚀系数增加,磨蚀和振动加剧,机组运行工况恶化。如果采用低频交流励磁变速发电机组,稳态运行时满足:

$$\omega_0 = \omega + \omega_s \quad (5)$$

式中: ω_0 为定子磁场同步转速; ω 为转子的电角速度; ω_s 为交流励磁电流的电角速度。

由式(5)可知,转子速度改变时,只要改变励磁电流的频率,就可以保证定子磁场的同步转速不变。这样,在水电站中,只需根据给定的水头和负荷,由机组特性算出对应的机组优化转速,然后,通过调节相应的励磁电流频率和导叶开度来调整;与此同时,在发电机侧控制负荷,调节励磁电流的转矩分量。这样,通过机电系统联合调节,可以让水轮机随着水头的变化而变速稳定运行,保证其运行(下转第 50 页)

为免塘基受水流淘刷,在塘脚修建坦水等护基建筑,并兴筑柴、石盘头以挑溜护塘。

3 经验探讨

钱塘江古海塘是我们的先辈在实践中不断加深对河口动力、边界条件的认识下,殚精竭虑,充分发挥聪明才智的成果,当时虽无现代科技知识,筑塘材料又有局限,但在结构、布置等方面,有的已接近、甚至吻合现代设计原理,其成就弥足珍贵,是中华民族古文化灿烂辉煌的一个方面,对其主要经验探讨如下:

a. 因地制宜选用不同的塘型结构.钱塘江海塘所在的钱塘江河口,上、下段的边界、动力条件均有差异.清陈汧已指出:“宁、盐两邑均以海为患,而潮有横冲、直冲之异,地有软沙、硬沙之别”^⑨.明代在海盐所建五纵五横鱼鳞石塘,面对迎面直冲的强浪,塘身宽厚;而清代在海宁所建鱼鳞大石塘,主要是面临顺塘横冲的涌潮淘刷,且塘基粉沙疏松,是以塘身较窄,而在基础加打几路马牙排桩,防止淘刷基土.在潮势较弱地段,为节省工料,又将内层条石改换成块石,成为条块石塘,因地制宜,各得其所.

b. 千方百计加强塘身的整体性和稳定性.明代为加强塘身的整体性、削弱水流沿砌石缝隙淘吸附土,将条石纵横交砌成丁字形,各层间上下错缝叠压成品字形,断面后侧砌石稍高于前侧成馒头形.清代复在条石间先用槽笋嵌联,后改用铁锭等扣接,并先后用石灰米汁等浆砌石,桐油麻绒抵缝,竭尽所能以稳定塘身.

c. 改进塘身迎潮面砌石收分使其有消能和挑浪作用.明代改石塘迎潮面壁立为逐层内收,收分均

一的阶级形,除增强稳定性外,还形成糙面,具有一定程度消杀潮浪动能的作用,清代将收分改成下(层)宽上(层)窄,顶面两层不设收分,即由均一坡改成变坡,兼具挑浪之巧,减少潮浪的越顶水量.

d. 允许难以加高的塘身越浪.海盐一带海塘附土经常受风浪或浪花越顶的侵蚀,前述清代试建“散水石戗”虽仅一小段,但这一思路与措施,基本上与现代的设计思想相吻合.

注释:

- ①朱俊.《江浙海塘建筑史·引言》,上海学习生活出版社,1955.
- ②宋·欧阳修等.《新唐书·权德舆传》.
- ③宋·卫泾.《后乐集》卷13.
- ④清·顾炎武.《日知录》卷10.
- ⑤清·袁国梓等.康熙《嘉兴府志》卷8.
- ⑥李文治,江太新.《清代漕运》.北京:中华书局,1995.
- ⑦宋·钱俨.《吴越备史·杂考》.
- ⑧元·脱脱等.《宋史》卷97.
- ⑨宋·潜说友.《咸淳临安志》卷31.
- ⑩明·宋濂等.《元史》卷50.
- ⑪清·唐煦春等.光绪《上虞县志》卷25.
- ⑫明·王方麓.《携李记》.
- ⑬明·樊维城等.天启《海盐县图经》卷8.
- ⑭清·方观承等.《两浙海塘通志》卷8.
- ⑮清·佚名.《海塘新案》第1册.
- ⑯清·李辅耀.《海宁念汛大口门二限三限石塘图说》.
- ⑰清·佚名.《续海塘新志》卷4.
- ⑱清·王如珪等.乾隆《海盐县续图经》卷4.
- ⑲清·方观承等.《两浙海塘通志》卷19.

(收稿日期:1999-01-26 编辑:张志琴)

(上接第38页)在最优单位转速附近,处于最佳运行工况.

其它动力的发电设备,如潮汐电站、风力电站、船舶电机等,都希望原动机能根据潮汐水位差、风力大小、船舶原动机转速而变化,采用交流励磁变速发电机能使原动机维持在最佳转速稳定运行;另外,这种变速电机用于抽水蓄能电站,不仅可以解决发电与水泵工况的转速不同的问题,还可以用来增加调峰填谷的能力,并可以提高电力系统的稳定性,同时,可以解决自启动问题.

4 结 语

交流励磁发电机由于励磁电流的幅值、相位甚至频率都可调,有功功率与无功功率可以独立调节,具有明显优于传统同步发电机的性能,是提高水轮

机效率、减少空蚀、磨蚀和振动的有效措施,并可以明显提高电力系统的静态和暂态稳定性,具有广阔的应用前景.

参考文献

- 1 Gish W B. An adjustable speed synchronous machine for hydroelectric power application. IEEE, 1981, 100(5): 2171 ~ 2175
- 2 Tsutomu Michigami. The improvement of power system stability of an adjustable-speed pumped-storage generator/motor. T. IEE, 1994, 114-B(2): 33 ~ 38
- 3 徐锦才,许大中.多相励磁发电技术的研究概况.电力系统自动化,1997(4): 44 ~ 46
- 4 徐锦才,许大中.多相励磁发电机的控制原理与性能分析,电工电能新技术,1997(1): 55 ~ 58

(收稿日期:1998-04-10 编辑:张志琴)