

文章编号:0254-0096(2020)04-0310-08

## 交流励磁抽水蓄能机组运行功率能力计算

李 辉<sup>1</sup>, 钟逸铭<sup>1</sup>, 宋二兵<sup>2</sup>, 黄樟坚<sup>1</sup>, 姚 然<sup>1</sup>, 黄智欣<sup>3</sup>

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 国网冀北电力有限公司检修分公司, 北京 102488;  
3. 东方电气集团东方电机有限公司, 德阳 618000)

**摘 要:** 具有交流励磁电机变速、功率解耦优点的抽水蓄能机组将在电力系统调峰、调频中发挥更好的作用,有必要研究考虑水头、流量和机组运行工况等约束条件下的可调速抽水蓄能机组运行功率能力的计算方法。首先,基于交流励磁电机电磁等效电路,考虑定、转子侧功率,推导发电和电动运行工况下的交流励磁电机接入电网侧的功率表达式;其次,考虑发电和抽水工况下水泵水轮机的工作特性,推导以水头和转速为变量的抽水蓄能机组的机械功率表达式,从而提出发电和抽水工况下交流励磁抽水蓄能机组运行功率极限的计算方法和流程;最后,以某实际抽水蓄能机组参数为例,分析不同水头和转速下机组运行功率范围,并通过时域仿真结果验证所提计算方法的有效性。

**关键词:** 抽水蓄能机组; 交流励磁电机; 水泵水轮机; 变水头; 运行功率能力

**中图分类号:** TM46

**文献标志码:** A

### 0 引 言

由于交流励磁电机具有变速恒频及功率解耦能力的优点,基于交流励磁电机的抽水蓄能机组(以下简称:交流励磁抽水蓄能机组)不仅可提高水泵水轮机运行效率,改善运行条件,提高水泵工况下自主调频能力,还可通过有功、无功的快速调节提高系统的稳定性<sup>[1]</sup>,在电网调峰调频中具有独特的优势<sup>[2-3]</sup>。然而,要充分发挥交流励磁抽水蓄能机组在电网中优势,考虑抽水蓄能机组机、电特性及不同运行工况,研究一种交流励磁抽水蓄能机组运行功率能力计算方法,对其在电网调度中的准确分析具有重要意义。

目前,对于交流励磁抽水蓄能机组运行功率能力计算的分析较少,主要侧重于机组的功率解耦和运行性能仿真方面,如文献[4-5]针对可变速抽水蓄能机组,建立交流励磁电机和机网侧变流器数学模型,提出有功-无功或者转速-无功解耦的控制策略,文献[6-7]基于采用的有功-无功解耦控制策略,对定子侧50%有功和无功波动和机组低电压穿越工况进行转速、功率等运行性能的仿真。研究其运行功率能力的大都仅涉及交流电机

本体,且主要用于风力发电,如文献[8-9]则基于交流励磁电机等效电路,推导定、转子功率表达式,并探讨发电运行时,定转子参数对其功率运行区域的影响。因此,基于抽水蓄能机组不同运行工况的特点,结合可逆水泵水轮机特性,有必要研究交流励磁抽水蓄能机组运行功率能力计算方法。

考虑交流励磁电机功率解耦特点,结合可逆水泵水轮机的工作特性,提出一种交流励磁抽水蓄能机组运行功率能力的计算方法。首先,基于交流励磁电机电磁等效电路,考虑定、转子侧功率,推导发电和电动运行时交流励磁电机接入电网侧功率表达式;其次,基于发电和抽水工况下水泵水轮机的工作特性,获取以水头和转速为变量的机组机械功率表达式,从而推导出交流励磁抽水蓄能机组接入电网侧运行功率极限的计算方法;最后,以某实际抽水蓄能机组参数为例,对其在不同转速和水头条件下机组运行功率能力进行分析,并通过时域仿真结果进行比较验证。

### 1 交流励磁电机运行功率能力

交流励磁电机电磁等效电路如图1所示,定子侧采

收稿日期: 2017-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(51675354); 中央高校基本科研业务费专项(106112017CDJZRPY0007); 重庆市研究生科研创新项目(CYB16020)

通信作者: 李 辉(1973—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事风力发电技术及新型电机控制方面的研究。cqulh@163.com

用发电机惯例,转子侧采用电动机惯例。

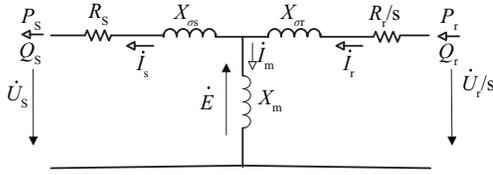


图1 交流励磁电机电磁等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of AC-excitation machine

图1中,  $R_s$ 、 $R_r$  分别为定转子电阻;  $X_{os}$ 、 $X_{or}$ 、 $X_m$  分别为定子电抗、转子电抗、激磁电抗;  $I_s$ 、 $I_r$ 、 $I_m$  分别为定子电流、转子电流、激磁电流有效值;  $s$  为转差率;  $U_s$ 、 $U_r$  为定转子电压有效值;  $E$  为气隙磁场感应电动势有效值;  $P_s$ 、 $Q_s$  为定子侧发出有功和无功功率。

基于交流励磁电机等效电路,可得其定子侧发出有功和无功功率的表达式(1)。

$$\left( P_s + \frac{3U_s^2 R_s}{R_s^2 + X_s^2} \right)^2 + \left( Q_s + \frac{3U_s^2 X_s}{R_s^2 + X_s^2} \right)^2 = \frac{9U_s^2 X_m^2 I_r^2}{R_s^2 + X_s^2} \quad (1)$$

由式(1)可看出,交流励磁电机定子侧有功和无功除了受机组自身参数  $X_m$ 、 $R_s$ 、 $X_s$  等影响外(其中  $X_s = X_{os} + X_m$ ),还受转子电流限制,设  $I_{\max}$  为转子电流的最大值,取额定、转子电流的 120%<sup>[10]</sup>,忽略定子电阻,可得定子侧无功功率运行范围,如式(2)。

$$\begin{aligned} -\frac{3U_s^2}{X_s} - \sqrt{\frac{9U_s^2 X_m^2 I_{\max}^2}{X_s^2} - |P_s|^2} \leq Q_s \leq \\ -\frac{3U_s^2}{X_s} + \sqrt{\frac{9U_s^2 X_m^2 I_{\max}^2}{X_s^2} - |P_s|^2} \end{aligned} \quad (2)$$

忽略定、转子电阻和变流器损耗,由定、转子功率流关系可得网侧变流器有功功率  $P_r$ <sup>[11]</sup>,如式(3)。

$$P_r = -sP_s = \frac{-s}{1-s} P_g \quad (3)$$

式中,  $P_s$  ——交流励磁电机接入电网侧的有功。

网侧变流器无功功率运行能力  $Q_r$  主要受变流器容量  $S_r$  的限制,其无功范围可表示为式(4)。

$$-\sqrt{S_r^2 - (|-sP_s|)^2} \leq Q_r \leq \sqrt{S_r^2 - (|-sP_s|)^2} \quad (4)$$

交流励磁电机接入电网侧的功率由机组定子侧功率和网侧变流器功率共同决定,其有功功率的正负由电机运行工况决定,无功功率则根据电网需求进行调整。因此,由定、转子功率流关系可得交流励磁电机接入电网侧的有功功率  $P_g$  表达式为式(5)。

$$P_g = P_s + P_r = (1-s)P_s \quad (5)$$

当机组运行在超同步速时,  $P_s$  和  $P_r$  功率方向相

同,  $P_g > P_s$ ; 当机组运行在次同步速时,  $P_s$  和  $P_r$  功率方向相反,  $P_g < P_s$ , 2种工况下机组有功功率都与转差率有关。

同理,机组无功功率  $Q_g = Q_s + Q_r$ , 因此,其无功功率运行能力范围可表示为式(6)。

$$\begin{aligned} -\frac{3U_s^2}{X_s} - \sqrt{\frac{9U_s^2 X_m^2 I_{\max}^2}{X_s^2} - |P_s|^2} - \sqrt{S_r^2 - (|-sP_s|)^2} \leq Q_g \leq \\ -\frac{3U_s^2}{X_s} + \sqrt{\frac{9U_s^2 X_m^2 I_{\max}^2}{X_s^2} - |P_s|^2} + \sqrt{S_r^2 - (|-sP_s|)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可看出,交流励磁电机无功功率与转差率和定子侧有功功率密切相关,同时网侧变流器无功功率最大值和最小值关于有功功率轴对称,而定子侧无功功率最大值和最小值关于有功功率轴不对称,使得式(6)中机组无功功率最大值和最小值关于有功功率轴不对称。

## 2 三可逆式水泵水轮机工作特性

### 2.1 水轮机工况时工作特性

机组在发电运行时,水泵水轮机等效于常规的水轮机,水轮机的输入功率与水头、管内水流量满足以下关系<sup>[12]</sup>:

$$P_T = \rho g H_T Q_T \eta_T \quad (7)$$

式中,  $\rho$  ——水的密度;  $g$  ——当地重力加速度;  $H_T$  ——水头;  $\eta_T$  ——水轮机工况时的效率;  $Q_T$  ——管内水流量,可通过导叶进行调节,由式(8)求得。

$$Q_T = KG \sqrt{H_T} \quad (8)$$

式中,  $G$  ——导叶开度;  $K$  ——流量-导叶曲线系数。

为了研究发电工况下抽水蓄能机组运行功率,有必要寻求影响水轮机机械功率的因素,然后通过机电耦合,将机械功率转换成电功率,从而得到表达式。基于交流励磁电机的抽水蓄能机组可实现变速下的最优效率运行。本文在分析其功率极限时,可认为机组保持固定的最优效率运行,并且在水轮机物理模型中,导叶开度作为调速器的输出量,反映了机组转子转速。因此水轮机输入功率可以由水头、机组转速表示,其框图如图2所示。

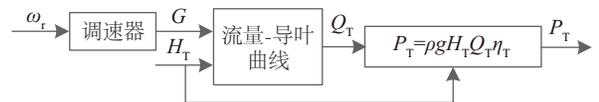


图2 水轮机输入功率框图

Fig. 2 Diagram of turbine input power

由图 2 可知,水轮机输入功率的产生是一个复杂且缓慢的物理过程,为了使电力系统快速、方便地得到机组功率,需要寻求机械功率与水头和转速的数学关系。可逆水泵水轮机根据导叶调节机组转速,当转速一定时,导叶确定,机组功率取决于水头。根据文献[13]得到机组转速数学关系式:

$$\omega_r = 0.95 + 1.25(P_T - 0.8) - 0.25(H_T - 0.8) \quad (9)$$

式中,  $\omega_r$  ——水泵水轮机转子转速。

化简式(9)可得水轮机输入功率与转速和水头的近似数学关系式:

$$P_T = 0.8\omega_r + 0.2H_T - 0.12 \quad (10)$$

### 2.2 水泵工作特性

抽水运行时,水泵的输出功率为:

$$P_p = \rho g H_p Q_p / \eta_p \quad (11)$$

式中,  $H_p$  ——扬程;  $Q_p$  ——管内水流量;  $\eta_p$  ——水泵工况时的效率。

水泵工况下,机组工作特性由扬程-流量曲线决定,如图 3 所示,当给定转速和扬程可求得管内水流量,进而得到水泵输出功率。根据文献[14-15]可知,扬程与管内水流量的关系满足二次多项式(12)。

$$H_p = a_0 \omega_r^2 + a_1 \omega_r |Q_p| + a_2 Q_p^2 \quad (12)$$

式中,  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  ——常数,且  $a_0 > 0$ ,  $a_1 < 0$ ,  $a_2 < 0$ 。式(13)、式(14)及(17)中提及的  $a_0$ 、 $a_1$  与  $a_2$  与式(12)中相同。

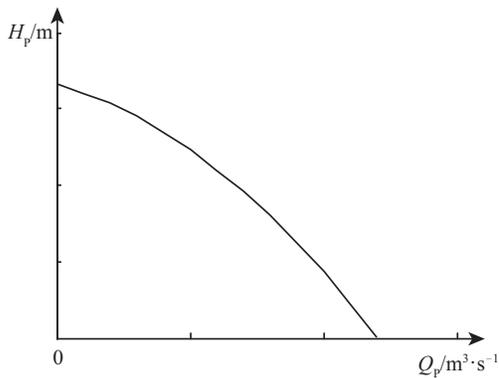


图3 扬程-流量特性曲线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pump head-flow curve

同样,为了研究电动工况下抽水蓄能机组运行功率能力,本节假定水泵水轮机运行在最优效率下,水泵输出功率可以由扬程、机组转速表示,其框图如图 4 所示。

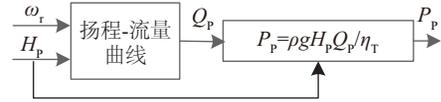


图4 水泵输出功率框图

Fig. 4 Diagram of pump output power

为了得到水泵输出功率与扬程和转速参数的数学关系,整理式(12),建立以  $Q_p$  为未知数的函数,利用二元一次方程求根方法可求得(其中舍弃流量小于零的值)。

$$Q_p' = \frac{a_1 \omega_r + \sqrt{a_1^2 \omega_r^2 + 4a_2(H_p - a_0 \omega_r^2)}}{-2a_2} \quad (13)$$

将式(13)代入式(11)可得到水泵输出功率数学表达式,见式(14)。

$$P_p = H_p \frac{a_1 \omega_r + \sqrt{a_1^2 \omega_r^2 + 4a_2(H_p - a_0 \omega_r^2)}}{-2a_2} \quad (14)$$

## 3 基于交流励磁电机的抽水蓄能机组功率能力计算

### 3.1 发电工况下抽水蓄能机组功率能力计算方法

在标么值系统中,忽略水轮机和交流励磁电机功率转换的损耗,两者的功率和转速是相等的,那么由式(10)可得抽水蓄能机组有功功率关于水头和转速的函数,见式(15)。

$$P_g(H_T, \omega_r) = 0.8\omega_r + 0.2H_T - 0.12 \quad (15)$$

如上文所述功率流关系,将水轮机机械功率表达式转换成机组电功率表达式,进而可得该抽水蓄能机组无功功率运行能力极限表达式,见式(16)。

$$\left\{ \begin{aligned} Q_{gmin} &= -\sqrt{\frac{9U_s^2 X_m^2 I_{max}^2}{X_s^2} - \left(\frac{0.8\omega_r + 0.2H_T - 0.12}{\omega_r}\right)^2} - \sqrt{S_r^2 - \left[\frac{\omega_r - 1}{\omega_r}(0.8\omega_r + 0.2H_T - 0.12)\right]^2} - \frac{3U_s^2}{X_s} \\ Q_{gmax} &= \sqrt{\frac{9U_s^2 X_m^2 I_{max}^2}{X_s^2} - \left(\frac{0.8\omega_r + 0.2H_T - 0.12}{\omega_r}\right)^2} + \sqrt{S_r^2 - \left[\frac{\omega_r - 1}{\omega_r}(0.8\omega_r + 0.2H_T - 0.12)\right]^2} - \frac{3U_s^2}{X_s} \end{aligned} \right. \quad (16)$$

由式(16)可看出,发电工况下抽水蓄能机组无功功率取决于定子侧和网侧无功功率能力,除了受机组参数和转子电流影响外,还会受到转速和水头的限制,其无功功率运行能力计算流程如图 5。

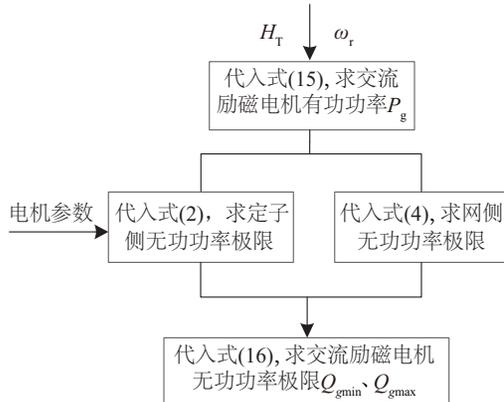


图5 发电工况下抽水蓄能机组无功功率计算流程图  
Fig. 5 Calculation flowchart of reactive power for pumped storage units in turbine mode

### 3.2 电动时抽水蓄能机组功率能力计算方法

忽略抽水蓄能机组损耗下,即水泵机械功率和交流励磁电机功率相等条件下,由式(14)可得电动工况下抽水蓄能机组有功功率,如式(17)。

$$P_g(H_p, \omega_r) = H_p \frac{a_1 \omega_r + \sqrt{a_1^2 \omega_r^2 + 4a_2(H_p - a_0 \omega_r^2)}}{-2a_2} \quad (17)$$

同样,将水泵机械功率表达式转换成机组电功率表达式,进而可得该机组在电动工况下无功功率运行能力的极限表达式,见式(18)。

$$\begin{cases} Q_{gmin} = -\sqrt{\frac{9U_s^2 X_m^2 J_{rmax}^2}{X_s^2} - \left(\frac{H_p Q_p'}{\omega_r}\right)^2} - \\ \sqrt{S_r^2 - \left[\frac{H_p Q_p'(\omega_r - 1)}{\omega_r}\right]^2} - \frac{3U_s^2}{X_s} \\ Q_{gmin} = \sqrt{\frac{9U_s^2 X_m^2 J_{rmax}^2}{X_s^2} - \left(\frac{H_p Q_p'}{\omega_r}\right)^2} + \\ \sqrt{S_r^2 - \left[\frac{H_p Q_p'(\omega_r - 1)}{\omega_r}\right]^2} - \frac{3U_s^2}{X_s} \end{cases} \quad (18)$$

由式(18)可看出,电动工况下抽水蓄能机组无功功率除了受机组参数和转子电流影响,还会受到转速和扬程的限制,其无功功率运行能力计算流程可表示如图6。

## 4 算例分析

为了验证本文所提计算方法的有效性,基于Matlab/Simulink 仿真平台,搭建交流励磁抽水蓄能机组的仿真模型,其系统连接示意图如图7所示,以卢森堡某抽水蓄能电站 230 MVA 的交流励磁电机<sup>[16]</sup>为例,其参数为:  $r_s = 0.004079$  pu,  $r_r' = 0.0016889$  pu,

$X_{os} = 0.11404$  pu,  $X_{or} = 0.1808$  pu,  $X_m = 2.38286$  pu, 定子线电压为 15750 V,极对数为 9,转速范围 0.9~1.1 pu,转子最大电流为 1.2 pu。

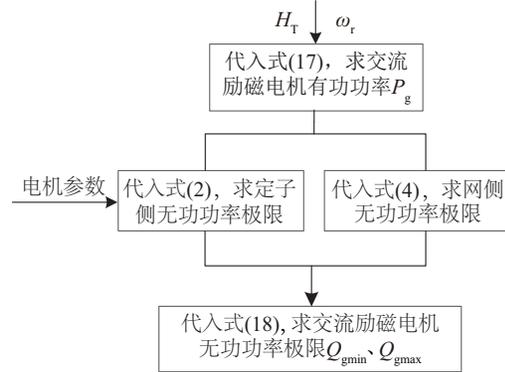


图6 电动工况下抽水蓄能机组无功功率计算流程图  
Fig. 6 Calculation flowchart of reactive power for pumped storage units in motor mode

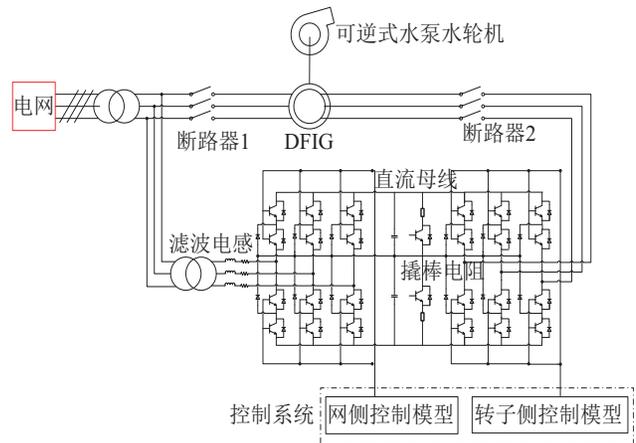


图7 交流励磁抽水蓄能机组系统连接示意图  
Fig. 7 Connection diagram of pumped storage system with AC-excitation machine

### 4.1 发电运行时抽水蓄能机组运行功率范围分析

发电运行时,假设水头为 1.1 pu,水轮机最优效率设为 0.9,流量-导叶曲线系数取  $K = 1.9$ ,按照图 5 计算流程,可得抽水蓄能机组在转速为 0.90、0.96、1.02、1.08 pu 条件下,发电工况时其有功功率运行能力范围,如图 8 所示。

利用同样的方法,可得水头为 1.0、0.9 pu 时抽水蓄能机组运行功率范围,将不同水头下的结果汇总到表 1 中,由图 8 和表 1 可看出:

1)在相同水头和一定无功范围内,随着转速增加,抽水蓄能机组有功能力增加,无功在次同步时运行范围变宽,超同步时运行范围变窄;

2)在相同转速下和一定无功范围内,随着水头的升高,抽水蓄能机组有功能力增加,无功运行范围变窄。

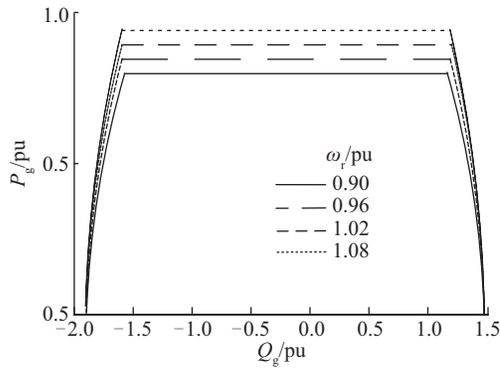


图8 不同转速下发电工况时抽水蓄能机组运行范围  
Fig. 8 Operational regions of pumped storage units at different speeds in generating mode

表1 不同调制策略下机侧变流器损耗对比

Table 1 Loss comparison of rotor side converter by using different modulation strategies

$H_T/pu$	$\omega_r/pu$	$P_g/pu$	$Q_g/pu$	$G$
0.9	0.90	0~0.780	-1.59~1.190	0.45
	0.96	0~0.828	-1.604~1.20	0.48
	1.02	0~0.876	-1.609~1.208	0.51
	1.08	0~0.924	-1.604~1.203	0.54
1.0	0.90	0~0.802	-1.572~1.171	0.40
	0.96	0~0.848	-1.588~1.187	0.43
	1.02	0~0.896	-1.593~1.193	0.45
1.1	0.90	0~0.820	-1.552~1.152	0.35
	0.96	0~0.868	-1.570~1.171	0.38
	1.02	0~0.916	-1.577~1.177	0.40
	1.08	0~0.964	-1.574~1.173	0.42

为了验证上述计算方法的有效性,本文对发电工况下交流励磁抽水蓄能机组的运行性能进行仿真,设定初始转速为 0.9 pu,水头为 0.9 pu,机组初始有功为 0.1 pu,无功 0.3 pu,在  $t=12\text{ s}$  和  $t=14\text{ s}$  时,有功不变,使无功分别变为 1.2 pu 和 -1.6 pu,得到机组功率和转子电流仿真结果,如图 9 所示。由图 9 可看出,当有功为 0.1 pu、无功为 0.3 pu 时,转子电流达到 0.5 pu,机组稳定运行,而当无功增加为 1.2 pu 和 -1.6 pu 时,超过运行范围,导致转子电流达到 1.3 pu,越过其最大值,不利于机组稳定运行,从而证明稳态计算与时域仿真的一致性。

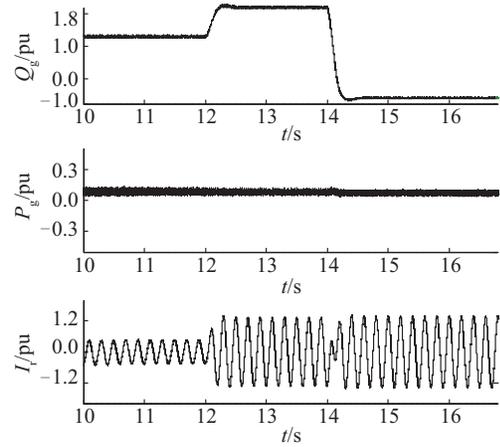


图9 发电工况下机组功率和转子电流仿真结果  
Fig. 9 Simulation result of power and rotor current of pumped storage units in generating mode

#### 4.2 电动运行时抽水蓄能机组运行功率范围分析

抽水运行时,假设水泵效率达到 0.9,扬程为 0.9 pu,选取扬程-流量曲线系数  $a_0 = 1.4, \alpha_1 = -0.2, a_2 = -0.3$ ,按照上述功率计算方法,可得转速为 0.90、0.96、1.02、1.08 pu 条件下,抽水蓄能机组运行功率范围如图 10 所示。

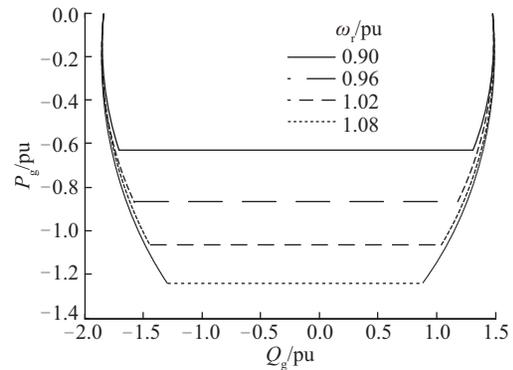


图10 不同转速下电动工况抽水蓄能机组运行范围  
Fig. 10 Operational regions of pumped storage units at different speeds in motoring mode

同样可得到扬程为 1.0、0.9 pu 时抽水蓄能机组运行功率范围,不同扬程下的结果见表 2,由图 10 和表 2 可看得:

- 1)在相同扬程和一定无功功率范围内,随着转速的增加,抽水蓄能机组有功能力增加,无功运行范围变窄;
- 2)在相同转速和一定无功功率范围内,随着扬程的升高,抽水蓄能机组有功能力降低,无功运行范围变宽;
- 3)对比发电和电动时机组运行功率计算结果可以

发现,相同水头和转速变化范围,机组在电动工况具有较大的功率运行范围;相同水头和转速条件下,次同步时机组在电动工况无功运行范围宽,超同步时机组在发电工况无功运行范围宽。

表2 电动工况抽水蓄能机组功率能力计算结果

Table 2 Calculation result of power ability for pumped storage units at different water heads in motoring mode

$H_T/\text{pu}$	$\omega_r/\text{pu}$	$P_g/\text{pu}$	$Q_g/\text{pu}$	$Q_p$
0.9	0.90	-0.633~0	-1.705~1.305	1.113
	0.96	-0.865~0	-1.573~1.173	1.376
	1.02	-1.064~0	-1.437~1.039	1.607
	1.08	-1.244~0	-1.286~0.885	1.820
1.0	0.90	-0.481~0	-1.792~1.392	0.913
	0.96	-0.794~0	-1.631~1.231	1.226
	1.02	-1.044~0	-1.458~1.058	1.483
	1.08	-1.260~0	-1.26~0.859	1.712
1.1	0.90	-0.184~0	-1.887~1.487	0.631
	0.96	-0.658~0	-1.723~1.322	1.050
	1.02	-0.980~0	-1.521~1.121	1.346
	1.08	-1.250~0	-1.281~0.881	1.596

为了证明电动工况下,上述计算方法的有效性,对交流励磁抽水蓄能机组的运行性能进行仿真,设定初始转速为 0.9 pu,水头为 0.9 pu,机组初始有功为 -0.1 pu,无功 0.3 pu,在  $t=12\text{ s}$  和  $t=14\text{ s}$  时,有功不变,而使无功功率分别变为 1.31 pu 和 -1.71 pu,得到机组功率和转子电流仿真结果,如图 11 所示。由图 11 可看出,当有功为 -0.1 pu、无功为 0.3 pu 时,转子电流达到 0.5 pu,机组

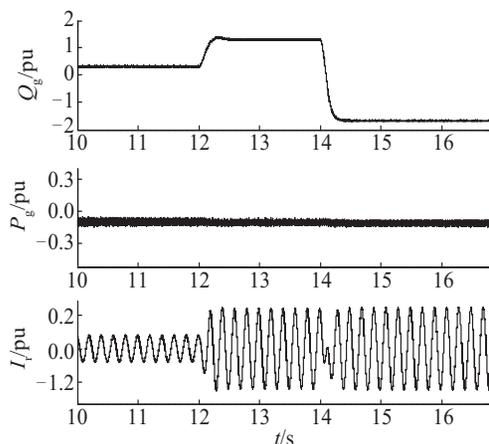


图 11 电动工况下机组功率和转子电流仿真结果

Fig. 11 Simulation result of power and rotor current of pumped storage units in motoring mode

稳定运行,而当无功增加为 1.31 pu 和 -1.71 pu 时,超过其运行范围,致使转子电流达到 1.3 pu,越过其最大值,从而证明稳态计算与时域仿真的一致性。

## 5 结 论

基于交流励磁电机等效电路,结合可逆水泵水轮机工作特性,推导以水头和转速为参量的抽水蓄能机组接入电网的运行功率极限表达式,可为交流励磁抽水蓄能机组的参与电网调度提供支撑。主要结论如下:

1) 通过电动与发电工况的时域仿真结果证明本文所提的抽水蓄能机组接入网运行功率能力计算方法的有效性。

2) 发电运行时,在相同水头和一定无功范围内,随着转速的增加,抽水蓄能机组有功运行能力增加,无功在次同步时运行范围变宽,超同步时运行范围变窄;在相同转速和一定无功范围内,随着水头的升高,有功能力增加,无功运行范围变窄。

3) 电动运行时,在相同扬程和一定无功范围内,随着转速的增加,抽水蓄能机组有功运行能力增加,无功运行范围变窄,在相同转速和一定无功范围内,随着扬程的增加,有功能力降低,无功运行范围变宽。

4) 电动与发电相比,相同水头和同一转速变化范围内,机组在电动工况具有较大的功率运行范围,在相同水头和转速下,次同步时机组在电动工况无功运行范围宽,超同步时机组在发电工况无功运行范围宽。

## [参考文献]

- [1] 郭海峰. 交流励磁可变速抽水蓄能机组技术及其应用分析[J]. 水电站机电技术, 2011, 34(2): 1-4.  
GUO H F. Technology and application of adjustable speed pumped storage units with AC excitation[J]. Mechanical & electrical technique of hydropower station, 2011, 34(2): 1-4.
- [2] 韩民晓, Othman Hassan Abdalla. 可变速抽水蓄能发电技术应用与进展[J]. 科技导报, 2013, 31(16): 69-75.  
HAN M X, ABDALLA O H. Progress in the power generation technology with variable speed pump storage and its applications [J]. Science & technology review, 2013, 31(16): 69-75.
- [3] 王松, 李庚银, 周明. 双馈风力功率机组无功调节机理及无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2714-2720.  
WANG S, LI G Y, ZHOU M. The reactive power

- adjusting mechanism & control strategy of doubly fed induction generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2714-2720.
- [4] NASIR U, IQBAL Z, RASHEED M T, et al. Active and reactive power control of a variable speed pumped storage system [C]//Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on. IEEE, Rome, Italy, 2015: 6-11.
- [5] PANNATIER Y, KAWKABANI B, NICOLET C, et al. Investigation of control strategies for variable speed pump-turbine units by using a simplified model of the converters [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2010, 57(9): 3039-3049.
- [6] GAYEN P K, CHATTERJEE D, GOSWAMI S K. Stator side active and reactive power control with improved rotor position and speed estimator of a grid connected DFIG (doubly-fed induction generator) [J]. Energy, 2015, 89(1): 461-472.
- [7] BIDGOLI M A, MOHAMMADPOUR H A, BATHAEE S M T. Advanced vector control design for DFIM-based hydropower storage for fault ride-through enhancement [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2015, 30(4): 1449-1559.
- [8] 陈宁, 王松岩, 胡朝燕, 等. 考虑静态稳定约束的双馈风电机组无功调节容量 [J]. 电力系统自动化, 2012, 35(24): 33-38.
- CHEN N, WANG S G, HU C Y, et al. Reactive power capability of DFIG-based wind power generator considering static stability constraint [J]. Automation of electric power systems, 2012, 35(24): 33-38.
- [9] 王磊, 贾宏杰. 无功协调控制策略对风电场并网系统小扰动稳定性的影响 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 28-33.
- WANG L, JIA H J. Impact of coordinated var control on small signal stability of power system with wind farm [J]. Electric power automation equipment, 2012, 32(11): 28-33.
- [10] 郎永强, 张学广, 徐殿国, 等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 77-82.
- LANG Y Q, ZHANG X G, XU D G, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 77-82.
- [11] 袁晓冬, 邱志鹏, 李群, 等. 双馈型风电机组网侧换流器无功功率调节控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(16): 2714-2720.
- YUAN X D, QIU Z P, LI Q, et al. Reactive power regulation strategy for grid-side converter of doubly-fed induction generator in wind farm [J]. Electric power automation equipment, 2014, 34(16): 2714-2720.
- [12] SIVAKUMAR N, DAS D, PADHY N P. Variable speed operation of reversible pump-turbines at Kadamparai pumped storage plant-a case study [J]. Energy conversion & management, 2014, 78(1): 96-104.
- [13] MULJADI E, SINGH M, GEVORGIAN V, et al. Dynamic modeling of adjustable-speed pumped storage hydropower plant [C]//Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE, Denver, CO, USA, 2015: 1-5.
- [14] LIANG J, HARLEY R G. Pumped storage hydro-plant models for system transient and long-term dynamic studies [C]//Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, Providence, RI, USA, 2010: 1-8.
- [15] BIDGOLI M A, MOHAMMADPOUR H A, BATHAEE S M T. Advanced vector control design for DFIM-based hydropower storage for fault ride-through enhancement [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2015, 30(4): 1449-1459.
- [16] HODDER A, SIMOND J J, SCHWERY A. Double trouble [J]. Industry applications magazine IEEE, 2008, 14(2): 32-39.

## CALCULATION OF OPERATION POWER ABILITY FOR ADJUSTABLE SPEED PUMPED STORAGE UNIT WITH AC-EXCITATION MACHINE

Li Hui<sup>1</sup>, Zhong Yiming<sup>1</sup>, Song Erbing<sup>2</sup>, Huang Zhangjian<sup>1</sup>, Yao Ran<sup>1</sup>, Huang Zhixin<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Equipment and System Safety of Power Transmission and Distribution & New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Jibei Maintenance Company, Beijing 102488, China; 3. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, China)

**Abstract:** Based on the advantages of adjustable speed and power decoupling of AC-excitation machine, the pumped storage unit are playing a better role in the peak shaving and the frequency adjustment in electric power system, and so it is necessary to study calculation method of operational power ability for adjustable speed pumped storage unit considering its impact factors including the water head, the flow rate and the operational condition. First, the power ability expressions of AC-excitation machine in generating and motoring are derived by using the electromagnetic equivalent circuit. Then, based on the working characteristics of pump-turbine units and pumping conditions, the mechanical power expression is presented with the water head and speed as variables, so that the operational power ability calculation method can be derived for the pump storage units using AC-excitation machine. Finally, taking the actual parameters of the pumped storage unit as an example, the operation power ability is analyzed with different water heads and speeds and the power decoupling operation is simulated. The results show that the presented operation power ability calculation method is valid.

**Keywords:** pumped storage power plants; AC generators; turbine pumps; adjustable water head; operational power ability