

交流励磁抽水蓄能机组快速功率响应控制策略

李 辉¹, 黄樟坚¹, 刘海涛¹, 宋二兵¹, 肖洪伟¹, 骆 林², 黄智欣²

(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. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000)

摘要: 基于交流励磁抽水蓄能机组运行特点, 分别建立可逆水泵水轮机和交流励磁电机数学模型; 针对可逆水泵水轮机在不同运行模式下的输出特性, 分别建立水轮机工况和水泵工况下的负荷特性优化流程; 结合电动和发电运行工况, 提出功率由交流励磁调节, 转速或导叶由可逆水泵水轮机控制的抽水蓄能机组快速功率响应控制策略。通过与传统转速励磁控制策略进行仿真比较, 结果表明所提控制策略能够同时提高机组的功率响应速率和可逆水泵水轮机运行效率。

关键词: 交流励磁抽水蓄能机组; 功率响应速率; 可逆水泵水轮机; 负荷特性优化

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.11.025

0 引言

可调速的交流励磁抽水蓄能机组 ACEPSU (AC Excited Pump Storage Unit) 由于采用交流励磁电机 ACEM (AC Excited Machine) 作为发电电动机, 克服了传统恒速抽水蓄能机组 FSPSU (Fixed Speed Pump Storage Unit) 转速不可调的缺点, 越来越受到人们的青睐^[1-3]。近年来, 随着大规模可再生能源接入电网, 为了发挥抽水蓄能机组的调峰调频能力, 要求其具有快速的功率响应速率。然而, 抽水蓄能机组的功率响应速率涉及水头、流量以及机组运行工况等诸多因素; 传统 ACEPSU 转速励磁控制由于忽略了可逆水泵水轮机在不同运行模式下的负荷特性以及机械导叶调节缓慢的特点, 严重制约了机组的功率响应速率和可逆水泵水轮机运行效率^[4-7]。因此, 结合可逆水泵水轮机的负荷特性, 开展 ACEPSU 快速功率响应控制策略的研究, 对提高机组功率响应速率和运行效率、发挥其调峰调频能力具有重要意义。

目前, 国内外关于 ACEPSU 的研究大多集中在系统建模和运行特性分析上^[8-12], 如文献^[8-9]和文献^[10]分别针对抽水蓄能机组水力机械系统和电气系统的建模进行研究; 文献^[11-12]通过对 ACEPSU 不同运行工况下调频特性和低电压穿越能力进行仿真分析, 并与 FSPSU 进行比较, 指出 ACEPSU 具有更好的运行性能。而涉及可逆水泵水轮机和交流励磁电机之间机电联合控制方面的研究较少, 有的也仅是关于 ACEM 的本体控制, 且多用于风力发电领域, 如文献^[13]提出采用转子磁场定向的矢量控制方法, 研究电机本体功率解耦控制; 文献^[14]研究不

同变流器拓扑结构下, 电机的稳态特性和起动特性等。虽然少数文献针对机组运行控制策略进行了相关研究^[4, 15-16], 但有的没有考虑可逆水泵水轮机的调节作用, 有的采用的可逆水泵水轮机模型过于简单, 使得机组功率控制效果过于理想。如文献^[4]提出 ACEPSU 的有功、无功解耦控制策略, 但仅限于机、网侧变流器的控制, 却未涉及可逆水泵水轮机模型、特性及其控制方面; 文献^[15]考虑了对可逆水泵水轮机的控制, 但由于其在系统建模的过程中将可逆水泵水轮机模型等效为恒转矩负载, 忽略了可逆水泵水轮机输出特性随工作水头(扬程)、流量等变化而变化的特点; 文献^[16]提出基于最大功率点跟踪(MPPT)的转速励磁控制策略, 但由于采用转速和无功解耦控制, 将转速作为励磁控制目标, 故机组功率响应速率较慢。因此, 为了提高 ACEPSU 功率响应速率, 有必要在考虑可逆水泵水轮机模型和负荷特性的条件下, 开展关于 ACEPSU 的功率响应控制策略的研究。

本文在详细分析可逆水泵水轮机负荷特性的基础上, 提出一种基于有功励磁控制的 ACEPSU 快速功率响应控制策略。首先, 基于交流励磁抽水蓄能机组运行特点, 分别建立可逆水泵水轮机和交流励磁电机数学模型; 然后, 针对可逆水泵水轮机在不同运行模式下的输出特性, 分别建立水轮机工况和水泵工况下的负荷特性优化流程; 最后, 结合电动和发电运行工况, 提出功率由交流励磁调节、转速或导叶由可逆水泵水轮机控制的抽水蓄能机组快速功率响应控制策略, 并与传统转速励磁控制策略进行比较, 验证了本文所提控制策略更具优越性。

1 ACEPSU 数学模型

1.1 可逆水泵水轮机数学模型

1.1.1 水轮机运行模式

当可逆水泵水轮机运行在水轮机模式时, 可等效

收稿日期: 2016-10-18; 修回日期: 2017-08-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377184); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(106112016CDJZR158802)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377184) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(106112016CDJZR158802)

为常规水轮机,其模型方程可表示为^[17]:

$$H = \left(\frac{Q}{g} \right)^2 \quad (1)$$

$$\dot{Q} = \frac{1}{T_w} \left(1 - \frac{Q^2}{A_i^2 g^2} \right) \quad (2)$$

$$\dot{g} = -K_a g + K_a u_{sm} \quad (3)$$

$$P_l = \gamma \eta_l H Q = 9.81 \eta_l H Q \quad (4)$$

其中, H 、 Q 和 g 分别为水轮机的有效水头(单位为 m)、流量(单位为 m^3/s)和导叶开度(单位为 mm); T_w 、 A_i 分别为水流惯性时间常数、导叶系数; K_a 、 u_{sm} 分别为伺服电机的时间常数、输入电压; P_l 为水轮机输出功率(单位为 kW); η_l 为水轮机效率; γ 为水的比重,其值为 9.81 N/m^3 。

1.1.2 水泵运行模式

当可逆水泵水轮机运行在水泵模式时,其水泵特性主要反映了扬程 H 、流量 Q 和水泵转速 n_r 三者之间的关系,通过曲线拟合可近似表示为一条下降的二次曲线^[18]:

$$H = a_0 n_r^2 + a_1 n_r Q + a_2 Q^2 \quad (5)$$

其中, a_0 、 a_1 、 a_2 为曲线拟合系数。

水泵运行工况下,由于节流效应的影响,使得水流在泵升过程中存在一定扬程损失,故泵升过程所需总扬程 H_{need} 包含静扬程 H_s 和损失扬程 H_l 两部分。由于损失扬程 H_l 与流量 Q 之间的关系近似为一条抛物线,因此,水泵模式下所需总扬程为:

$$H_{\text{need}} = H_s + H_l = H_s + f_e Q^2 \quad (6)$$

其中, f_e 为水泵摩擦系数。

水泵模式下机械功率 P_m 可表示为:

$$P_m = \gamma \eta_p H Q = 9.81 \eta_p H Q \quad (7)$$

其中, η_p 为水泵效率。

1.2 ACEM 数学模型及机、网侧变流器控制模型

将 ACEM 在三相静止坐标系下的数学模型转换到两相同步速旋转坐标系下,可由电压方程表示的 ACEM 数学模型为^[19-20]:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p \psi_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p \psi_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p \psi_{rd} - (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p \psi_{rq} + (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (8)$$

其中, ω_r 为转子角速度; ω_1 为同步角速度; R_s 、 R_r 分别为定、转子绕线电阻; u_{sd} 、 u_{sq} 和 u_{rd} 、 u_{rq} 分别为定子和转子电压 d 、 q 轴分量; i_{sd} 、 i_{sq} 和 i_{rd} 、 i_{rq} 分别为定子和转子电流 d 、 q 轴分量; ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 和 ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 分别为定子和转子磁链 d 、 q 轴分量; p 为微分算子。

为了实现 ACEM 的功率解耦及对直流母线电压的控制,机、网侧变流器分别采用定子电压定向、电网电压定向的矢量控制策略^[21],机、网侧变流器控制模型如图 1 所示。图中, ω_s 为同步角频率; L_r 和 L_m 分别为转子等效自感和互感。

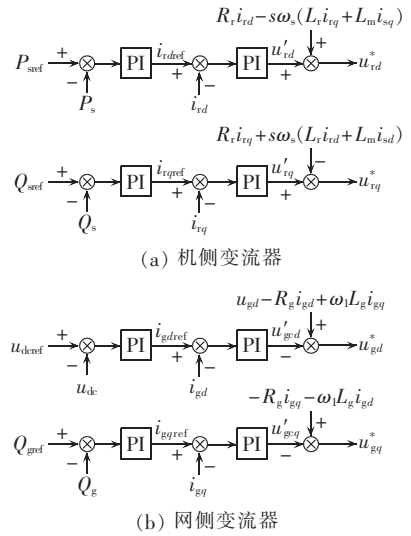


图 1 ACEM 变流器控制模型

Fig.1 Control model of ACEM converter

2 可逆水泵水轮机负荷特性优化分析

2.1 水轮机负荷特性优化分析

由流体力学和水轮机运行规律可知,水轮机单位转速 n_1 和水头 H 的关系为:

$$n_1 = n_r D / \sqrt{H} \quad (9)$$

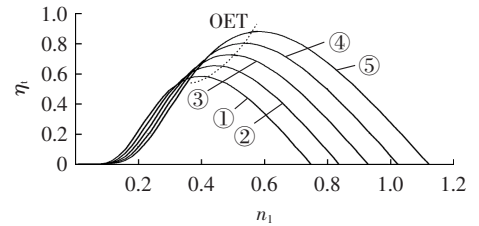
其中, D 为转轮直径(单位为 m)。可见,在电机转速固定不变的情况下,当水头发生变化时,水轮机单位转速随之变化;当水头不变时,水轮机效率 η_l 可表示为关于单位转速 n_1 和单位流量 Q_1 的多项式函数^[22]。

$$\eta_l(n_1, Q_1) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{90}{\lambda} + Q_1 + 0.78 \right) \exp \left(-\frac{50}{\lambda} \right) \right] \times 3.33 Q_1 \quad (10)$$

其中, $\lambda = \left(\frac{1}{\lambda_i + 0.089} - 0.0035 \right)^{-1}$, $\lambda_i = \frac{R A_r n_1}{Q_1}$, R 、 A_r

分别为水轮机叶轮半径(单位为 m)、叶轮旋转时扫过的面积(单位为 m^2)。

由式(10)可以得到,不同单位流量下水轮机效率随单位转速(标么值)的变化曲线,如图 2 所示。



① $Q_1 = 0.29 \text{ p.u.}$, ② $Q_1 = 0.32 \text{ p.u.}$, ③ $Q_1 = 0.35 \text{ p.u.}$
④ $Q_1 = 0.38 \text{ p.u.}$, ⑤ $Q_1 = 0.41 \text{ p.u.}$

图 2 不同单位流量下水轮机效率-单位转速关系图

Fig.2 Curve of turbine efficiency vs. speed under different unit fluxes

从图 2 中可以看出,不同单位流量下,水轮机的最优单位转速 n_1^* (效率最高时对应的单位转速)会

随之发生变化;当水轮机单位转速偏离最优单位转速时,水轮机效率会降低,气蚀系数增大,水轮机磨损和振动增加,最终导致系统运行工况恶化。因此,在满足机组出力要求的前提下,为了提高水轮机运行效率,并保证水轮机始终沿最优效率轨迹 OET(Optimal Efficiency Track)运行,本文提出水轮机负荷优化流程。通过对水轮机负荷特性进行优化,计算出对应的最优单位转速 n_1^* ,进而得到水轮机最优转速 n_r^* ;通过调节水轮机调速器和电机的励磁电流频率来实现对水轮机最优效率运行的控制。具体的负荷优化流程如图 3 所示。

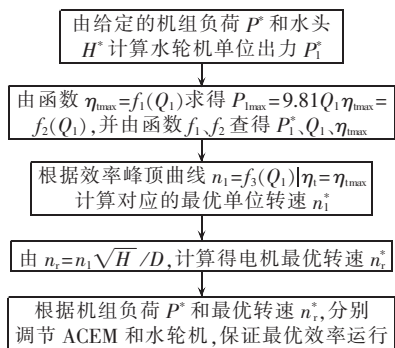


图 3 水轮机负荷优化流程

Fig.3 Optimization flowchart of turbine load

2.2 水泵负荷特性优化分析

由 1.1 节可知,水泵运行工况点指水泵在稳定运行状态下所提供的能量与装置所需能量的平衡点,即水泵性能 $H-Q$ 曲线(式(5))和管路特性 $H_{need}-Q$ 曲线(式(6))的交点。由水泵的效率-流量特性可知,水泵效率 η_p 与流量 Q 可近似成开口向下的二次曲线关系^[23],因此可得水泵模式下扬程 H 和效率 η_p 与流量 Q 之间的关系,如图 4 所示。

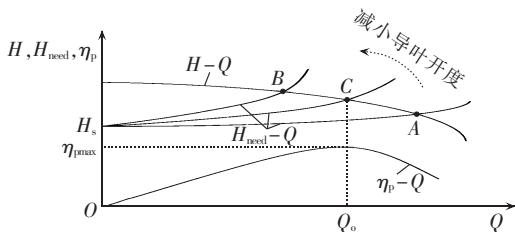


图 4 水泵调节特性示意图

Fig.4 Schematic diagram of pump regulation characteristics

由于水泵管道节流效应的影响,水泵摩擦系数 f_e 可以等效为管道摩擦系数 f_p 与附加摩擦系数 f_g 之和。

$$f_e = f_p + f_g \tag{11}$$

$$f_g = 1/g - 1 \tag{12}$$

将式(11)、(12)代入式(6)可得:

$$H_{need} = H_s + \left(f_p + \frac{1}{g} - 1 \right) Q^2 \tag{13}$$

由式(13)和图 4 可知,通过改变水泵导叶开度

g ,可以改变管道特性 $H_{need}-Q$ 曲线与水泵特性 $H-Q$ 曲线的交点(图中点 A、C、B),从而达到改变水泵工作点的目的;当 $H_{need}-Q$ 曲线与 $H-Q$ 曲线相交于点 C 时,水泵效率达到最高 η_{pmax} ,此时对应的导叶开度即为最优导叶开度 g^* 。基于此,本文提出水泵负荷优化流程,通过对水泵负荷特性进行优化,计算出对应的最优导叶开度 g^* ,进而通过调节机械导叶,实现水泵的最优效率运行。具体的负荷优化流程如图 5 所示。

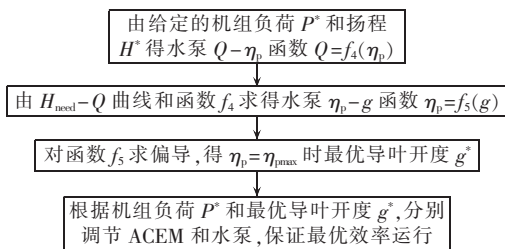


图 5 水泵负荷优化流程

Fig.5 Optimization flowchart of pump load

3 ACEPSU 快速功率响应控制策略

基于上述对可逆水泵水轮机在水轮机模式和水泵模式下的负荷特性优化分析,并结合电动和发电运行工况,提出功率由交流励磁调节、转速或导叶由可逆水泵水轮机控制的 ACEPSU 快速功率响应控制策略,控制框图如图 6 所示。

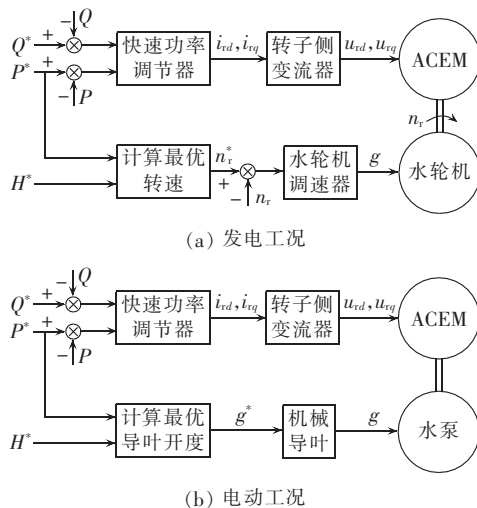


图 6 不同运行工况下的 ACEPSU 控制流程图

Fig.6 Control flowchart of ACEPSU in different operation modes

2 种工况下电机侧均采用有功无功解耦控制,当机组有功 P^* 发生变化时,ACEM 会通过快速功率调节器对有功信号进行处理,并将得到的转子 dq 轴电流传递给转差率变流器,进而实现对机组有功功率的快速调节。发电工况下,水轮机根据给定有功 P^* 和水头 H^* ,基于水轮机负荷特性优化流程计算出相应的最优转速 n_r^* ,最优转速 n_r^* 经水轮机调速器后输出导叶控制信号,并通过调节导叶开度实现对机组转

速的控制。电动工况下,水泵根据给定有功 P^* 和扬程 H^* ,基于水泵负荷特性优化流程获得相应的最优导叶开度 g^* ,并通过控制机械导叶,实现水泵的位置寻优过程。

基于图 6 所示的 ACEPSU 在发电、电动工况下的控制流程,并结合 1.2 节网侧变流器控制模型,本文提出基于功率励磁控制的 ACEPSU 快速功率响应控制策略,并传统转速励磁控制进行对比,详细的控制框图如图 7 所示。图中采用传统转速励磁控制时,电机侧采取转速和无功解耦控制,可逆水泵水轮机侧采取有功单闭环控制。

4 算例分析

为了验证所提快速功率响应控制策略的有效性,本文基于 MATLAB/Simulink 软件平台搭建 ACEPSU 系统仿真模型。系统仿真参数如下:ACEM 的额定容量 $S_N=196.6\text{ MV}\cdot\text{A}$,额定电压 $U_N=15.75\text{ kV}$,额定频率 $f_N=50\text{ Hz}$,极对数 $p=6$,转动惯量 $J=2.3\times10^6\text{ kg}\cdot\text{m}^2$;可逆水泵水轮机的额定功率 $P_N=171\text{ MW}$,额定水头 $H_N=1\text{ m}$,水流时间常数 $T_w=3\text{ s}$,管道摩擦系数 $f_p=0.01$,附加摩擦系数 $f_g=0.005$ 。分别在发电和电动运行工况下,对比提出的快速功率响应控制策略与已有传统的转速励磁控制策略的控制效果。

4.1 发电运行工况

假定机组初始出力为 0.5 p.u.、水头为 0.9 p.u.、初始最优转速为 0.95 p.u.; $t_1=15\text{ s}$ 时,机组出力由 0.5 p.u. 阶跃增至 0.7 p.u.。由水轮机负荷特性优化流程可计算出有功出力变化后最优转速变为 1.05 p.u.,得到 ACEPSU 在发电工况运行时的功率响应速率仿真

结果,如图 8 所示。图中,机组出力 P 、转速 n_r 、转子电流 i_r 、导叶开度 g 、定子电压 u_s 均为标么值,后同。

从图 8(a)中可以看出,发电工况下,2 种控制策略均能实现对机组有功出力的调整,但同样针对有功突增 0.2 p.u.(39 MW)的情况,机组采用本文所提快速功率响应控制策略时只需 0.2 s 就趋于稳定,而采用传统转速励磁控制策略时则需要 2.5 s 才能达到同样的效果。这说明在发电工况下,针对相同有功出力增加的情况,本文所提快速功率响应控制策略的调节速度更快,由原来的 15.6 MW/s 增加到 195 MW/s,能够明显提高机组功率响应速率。这是由于本文所提控制策略采用功率作为励磁控制目标,当机组给定有功发生突变时,可以通过变流器快速调整转子电流的幅值(图 8(c)),从而控制机组实际出力快速响应。从图 8(b)和 8(d)中可以看出,当采用本文所提控制策略时,转速先下降然后缓慢上升;而采用转速励磁控制策略时,转速直接迅速上升。这是因为前者中的转速由水轮机导叶控制,而后者中的转速由电机转子励磁控制。由于机械导叶的动作速度比励磁响应要慢很多,因此当采用本文所提控制策略时,机组出力在没有达到给定值前,可逆水泵水轮机的出力无法与电机发出的功率平衡,电机会通过降低转速释放转子的旋转能量来补偿机组的功率失衡。当机械导叶的开度增加至给定值后,转速会在导叶的调节作用下重新上升并达到新的最优转速点稳定运行。从图 8(e)中可以看出,所提控制策略下机组定子侧电压始终保持稳定。

4.2 电动运行工况

假定机组初始出力为 -0.5 p.u.、扬程为 0.9 p.u.、

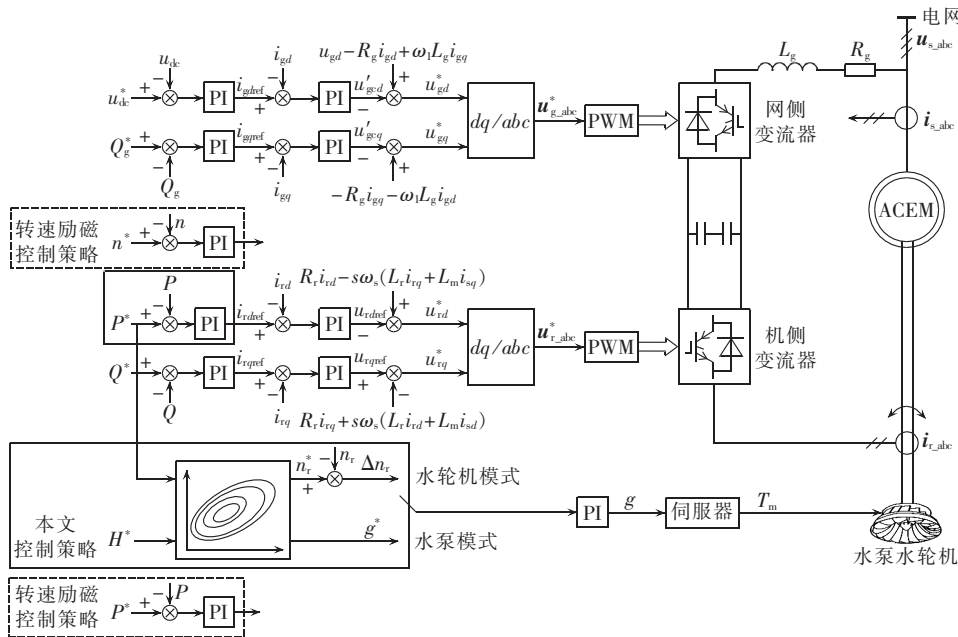


图 7 ACEPSU 控制框图

Fig.7 Control block diagram of ACEPSU

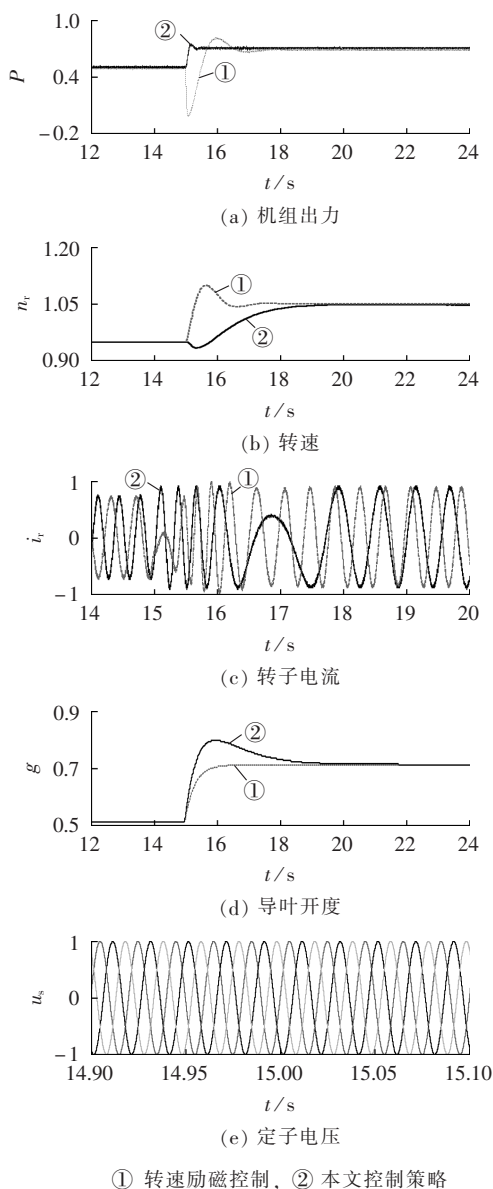


图 8 不同控制策略下功率响应性能对比(发电工况)

Fig.8 Comparison of power response performances under different control strategies(generator mode)

初始最优导叶开度为 0.5 p.u.; $t_1=20$ s 时,机组出力由 -0.5 p.u. 阶跃至 -0.9 p.u.。由水泵负荷特性优化流程可计算出有功出力变化后最优导叶开度变为 0.9 p.u.,得到 ACEPSU 在电动工况运行时的功率响应速率仿真结果,如图 9 所示。

从图 9(a)中可以看出,电动工况下,2 种控制策略也均能实现对机组吸收有功出力的调整,但同样针对有功突增 0.4 p.u.(79 MW)的情况,机组采用快速功率响应控制策略时只需 0.2 s 就趋于稳定,而采用转速励磁控制策略时则需要 2 s 才能达到同样的效果。这说明在电动工况下,针对相同有功出力增加的情况,本文所提快速功率响应控制策略的调节速度更快,由原来的 39.5 MW/s 增加到 395 MW/s,能够明显提高机组功率响应速率。从图 9(e)中可以看

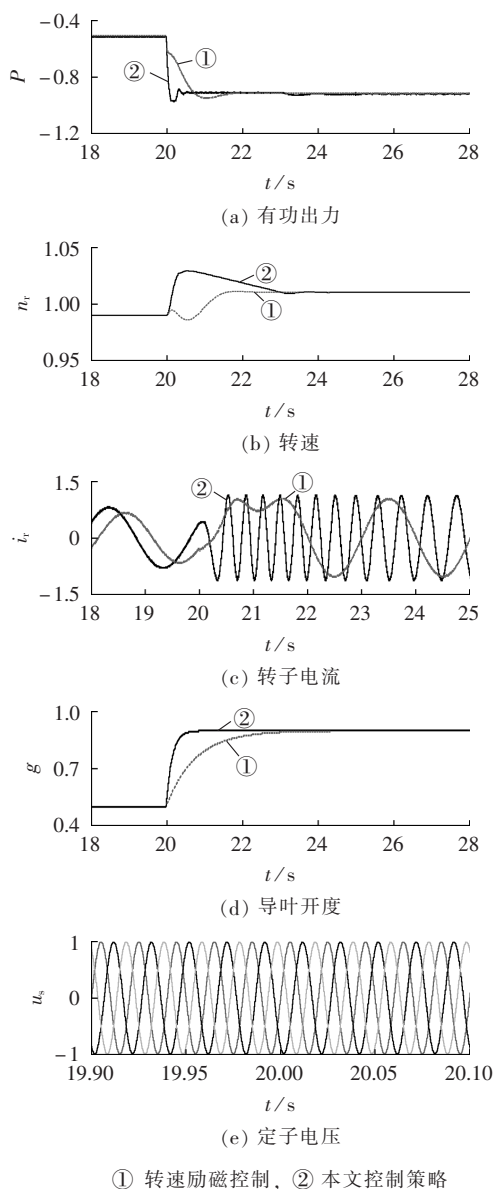


图 9 不同控制策略下功率响应性能对比(电动工况)

Fig.9 Comparison of power response performances under different control strategies(motor mode)

出,所提控制策略下抽水蓄能机组定子侧电压能够始终保持稳定。

5 结论

本文通过详细分析可逆水泵水轮机不同运行模式下的输出特性,分别建立水轮机模式和水泵模式下的负荷特性优化流程,提出一种适用于电动和发电运行的功率励磁控制 ACEPSU 快速功率响应控制策略,并通过搭建 ACEPSU 系统仿真模型,对比传统转速励磁控制策略和本文所提控制策略,结果表明,本文所提控制策略能够有效提高机组功率响应速率,发电工况下,机组功率响应速率由 15.6 MW/s 增加到 195 MW/s;电动工况下,功率响应速率由 39.5 MW/s 增加到 395 MW/s,缩短了机组反应时间,有利于发

挥 ACEPSU 参与电网调峰调频的作用。虽然本文采用改进控制策略提高的功率响应速率未超出大型抽水蓄能机组最大爬坡速率的限制,但是有功功率响应速率增加可能带来机组轴系扭振问题,这值得进一步开展研究。

参考文献:

- [1] ARDIZZON G. A new generation of small hydro and pumped-hydro power plants: advances and future challenges[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 31(2): 746-761.
- [2] KORITAROV V, GUZOWSKI L, FELTES J, et al. Modeling adjustable speed pumped storage hydro units employing doubly-fed induction machines[R]. [S.l.]: Argonne National Laboratory, 2013.
- [3] 王之纯, 王德贤, 钟才惠. 可变速抽水蓄能机组控制系统的仿真研究[J]. *电网技术*, 2013, 41(2): 32-35.
WANG Zhichun, WANG Dexian, ZHONG Caihui. Simulation study on the control system of adjustable speed pumped storage unit [J]. *Power System Technology*, 2013, 41(2): 32-35.
- [4] NASIR U, IQBAL Z, RASHEED M T, et al. Active and reactive power control of a variable speed pumped storage system[C]//2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Rome, Italy: IEEE, 2015: 6-11.
- [5] 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 and Management*, 2014, 78: 96-104.
- [6] 曾鸣, 王睿淳, 王良, 等. 电力市场中考虑水头约束的抽水蓄能电站竞价模型[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(7): 134-138.
ZENG Ming, WANG Ruichun, WANG Liang, et al. Bidding model considering constraints of water head for pumped storage plant in power market[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(7): 134-138.
- [7] WALSETH E C, NIELSEN T K, SVINGEN B. Measuring the dynamic characteristics of a low specific speed pump-turbine model[J]. *Energies*, 2016, 9(3): 199.
- [8] FANG H, CHEN L, DLAKAVU N, et al. Basic modeling and simulation tool for analysis of hydraulic transients in hydroelectric power plants[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, 23(3): 834-841.
- [9] KOPF E, BRAUSEWETTER S, GIESE M, et al. Optimized control strategies for variable speed machines[C]//22nd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Stockholm, Sweden: [s.n.], 2004: 1-9.
- [10] MULJADI E, SINGH M, GEVORGIAN V, et al. Dynamic modeling of adjustable-speed pumped storage hydropower plant[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [11] BIDGOLI M A, BATHAE S M T. Performance evaluation for state of the art adjustable-speed pumped storage plant compared to fixed-speed one[J]. *Science International*, 2014, 26(5): 1985-1990.
- [12] SCHMIDT E, ERTL J, PREISS A, et al. Studies about the low voltage ride through capabilities of variable-speed motor-generators of pumped storage hydro power plants[C]//2011 21st

Australasian Universities Power Engineering Conference(AUPEC). Brisbane, QLD, Australia: IEEE, 2011: 1-6.

- [13] LUNG J K, YING L, HUNG W L, et al. Modeling and dynamic simulations of doubly fed adjustable-speed pumped storage units[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, 22(2): 250-258.
- [14] KRUGER K, KOUTNIK J. Dynamic simulation of pump-storage power plants with different variable speed configurations using the Simsen tool[J]. *International Journal of Fluid Machinery & Systems*, 2009, 2(4): 334-345.
- [15] SCHMIDT E, ERTL J, PREISS A, et al. Simulation of steady-state and transient operational behavior of variable-speed motor-generators of hydro power plants[C]//2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference(IEMDC). Niagara Falls, ON, Canada: IEEE, 2011: 607-611.
- [16] BELHADJI L, BACHA S, MUNTEANU I, et al. Adaptive MPPT applied to variable-speed micro-hydropower plant[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2013, 28(1): 34-43.
- [17] GROUP W. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1992, 7(1): 167-179.
- [18] LIANG J, HARLEY R G. Pumped storage hydro-plant models for system transient and long-term dynamic studies[J]. *Power & Energy Society General Meeting IEEE*, 2010, 89(1): 1-8.
- [19] 唐浩, 郑涛, 黄少锋, 等. 考虑 Chopper 动作的双馈风电机组三相短路电流分析[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(3): 76-83.
TANG Hao, ZHENG Tao, HUANG Shaofeng, et al. Analysis on three-phase short-circuit current of DFIG-based wind turbines considering Chopper protection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(3): 76-83.
- [20] 郑涛, 魏旭辉, 李娟, 等. PI 控制参数对双馈风电机组短路电流特性的影响分析[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(7): 15-21.
ZHENG Tao, WEI Xuhui, LI Juan, et al. Influence of PI control parameters on short circuit current characteristics of DFIG[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(7): 15-21.
- [21] DATTA S, ROY A K, MISHRA J P. Performance analysis of a DFIG based variable speed wind energy conversion system[J]. *Discovery*, 2015, 47(216): 29-36.
- [22] BELHADJI L, BACHA S, ROYE D. Control of a small variable speed pumped-storage power plant[C]//4th International Conference on Power Engineering and Electrical Drives. Istanbul, Turkey: [s.n.], 2013: 787-792.
- [23] 张景成. 水泵与水泵站[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2010: 27-32.

作者简介:



李 辉

李 辉(1973—),男,浙江永康人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为风力发电技术、新型电机及其系统分析(E-mail: ecqlh@163.com);

黄樟坚(1992—),男,江西吉安人,硕士研究生,研究方向为交流励磁电机运行与控制(E-mail: hzj_043@163.com)。

(下转第 175 页 continued on page 175)

A two-stage fixed-range equivalent energy function method for probabilistic production simulation on hydro-thermal generation system

HU Xiaofei¹,LIN Jie²,GUO Ruipeng³,TANG Wei¹,YANG Cheng¹,LIU Junhong³

- (1. State Grid Anhui Electric Power Dispatch & Control Center,Hefei 230022,China;
- 2. Guangxi Electric Power Dispatch & Control Center,Nanning 530023,China;
- 3. College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027,China)

Abstract: Since the effective range of the equivalent energy function change continuously during probabilistic production simulation,the fixed effective range is obtained by translation transformation,and thereby the computational efficiency is improved. Based on the analysis of the error sources of the equivalent energy function,a two-stage fixed-range equivalent energy function method is proposed. In the first stage,the position of loads applied by hydro-thermal power is coordinated and optimized,and according to the maximal common factor of the system load and the capacity of each unit,the simulation interval is determined as large as possible to the improve the computational efficiency without loss of precision. In the second stage, only the hydropower plants with idle capacity is simulated,which could improve the computational precision of LOLP(Loss Of Load Probability) by utilizing smaller simulation intervals. Simulative results of the modified IEEE-RTS 79 system demonstrate that the proposed method is computationally more efficient than traditional equivalent energy function methods with a same calculation precision,and therefore it is more suitable for cases where the requirement of LOLP index is high.

Key words: hydro-thermal generation system; probabilistic production simulation; equivalent energy function method; fixed-range; two-stage optimization; reliability index

(上接第 161 页 continued from page 161)

Control strategy of rapid power response for AC excited pump storage unit

LI Hui¹,HUANG Zhangjian¹,LIU Haitao¹,SONG Erbing¹,XIAO Hongwei¹,LUO Lin²,HUANG Zhixin²

- (1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University,Chongqing 400044,China;2. Dongfang Electric Machinery Co.,Ltd.,Deyang 618000,China)

Abstract: Based on the operating characteristics of ACEPSU(AC Excited Pumped Storage Unit),the models of both reversible pump turbine and AC excited machine are established. In view of the different output characteristics of reversible pump turbine,load optimization flowcharts of turbine and pump are presented. Combined with operating conditions of the motor and generator mode,a rapid power response control strategy for ACEPSU is proposed,in which the power is controlled by AC excited machine and both the rotor speed and gate are controlled by reversible pump turbine. Comparison of simulative results between the conventional and proposed strategy indicates that the proposed strategy can not only improve the power response rate of ACEPSU,but also increase the efficiency of reversible pump turbine.

Key words: AC excited pump storage unit; power response rate; reversible pump turbine; load characteristic optimization