

# 全功率变速抽水蓄能机组水泵模式建模及运行特性研究

潘鹏宇<sup>1,2</sup>, 史华勃<sup>1,2</sup>, 陈刚<sup>1,2</sup>, 丁理杰<sup>1,2</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041)

**摘要:**全功率变速抽水蓄能机组(FSC-VSPSU)能够为电网提供快速、灵活的调节容量,助力新能源为主体的新型电力系统快速发展,其应用逐渐广泛。为掌握实际FSC-VSPSU在水泵工作模式(抽水)时的运行特性,以及分析工程现场出现的实际问题,建立了FSC-VSPSU水泵模式下的仿真模型。此外,FSC-VSPSU在水泵模式时通常采用直接开度控制方法,对抽水功率无法精确控制,通过外加功率控制环,就能够很好地控制抽水功率,可补充作为机组的另一种控制方法。通过仿真FSC-VSPSU在直接开度控制以及外加功率控制环两种方式下的运行,总结了其运行特性,为实际FSC-VSPSU现场运行提供仿真工具以及运行调试指导。

**关键词:**全功率变速抽水蓄能机组;水泵模式;仿真建模;运行特性

中图分类号:TM 77 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2024)03-0013-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240303

## Modeling and Operating Characteristics of Variable Speed Pumped Storage Unit with Full-size Converter in Pumping Mode

PAN Pengyu<sup>1,2</sup>, SHI Huabo<sup>1,2</sup>, CHEN Gang<sup>1,2</sup>, DING Lijie<sup>1,2</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Power Internet of Things Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** The variable speed pumped storage unit with full-size converter (FSC-VSPSU) can provide fast and flexible regulation capacity for power grid, assisting the rapid development of new energy dominated power systems, and its application is gradually becoming widespread. In order to grasp the operating characteristics of actual FSC-VSPSU in pumping mode and analyze the actual problems that may occur in engineering site, a simulation model of FSC-VSPSU in pumping mode is established. In addition, FSC-VSPSU usually adopts the direct opening level control in pumping mode, which cannot accurately control the pumping power. Another control method is proposed to use an external power control loop to effectively control the pumping power as the supplementary method for the unit. By simulating the operation of FSC-VSPSU under direct opening level control and external power control loop, the operating characteristics are summarized, which can provide a simulation tool and commissioning guidance for the actual on-site operation of FSC-VSPSU.

**Key words:** variable speed pumped storage unit with full-size converter; pumping mode; simulation modeling; operating characteristics

## 0 引言

四川,特别是川西高原地区新能源风、光资源极

基金项目:中国博士后科学基金项目(2023MD734166);国家电网有限公司科技项目(521997230002)

为丰富,大力开发风、光能源是实现国家“双碳”目标的关键一环。然而,风光发电具有较强的波动性、随机性和间歇性,导致新型电力系统在接纳风光能源时面临灵活调节能力严重不足的问题,迫使地区“弃风、弃光”,严重阻碍地区新能源产业发展。四川是全国最大的水电基地,发展全功率变速抽水蓄

能(variable speed pumped storage unit with full-size converter, FSC-VSPSU)是提升四川电网灵活调节能力的不二之选,是保障四川新能源大规模并网的重要基石<sup>[1-3]</sup>。

为了掌握 FSC-VSPSU 的运行特性,以及便于分析工程现场所遇到的问题,对 FSC-VSPSU 进行仿真建模至关重要。通常情况下,FSC-VSPSU 具有两种工作模式,即发电模式和抽水模式。文献[4]基于 Matlab/Simulink 对发电模式进行了完整的仿真建模,并分析了快速功率控制以及快速转速控制下的运行特性,但未考虑抽水模式下水泵的详细建模。文献[5]介绍了 FSC-VSPSU 发电和抽水两种情况下的控制方法,并搭建了相应的动模平台,但也未考虑水泵的详细模型。文献[6]利用 FSC-VSPSU 的功率调节抑制了新能源接入电网带来的功率波动,并基于 Matlab/Simulink 建立了仿真模型,但同样未考虑水泵模型。

对于 FSC-VSPSU 实际机组,通常使用直接开度控制方法,能够简单有效地对机组的抽水过程进行控制,但是对于机组实际的抽水功率无法精确地控制。为了完善抽水模式的仿真模型,并对抽水功率进行精确控制,在建模时详细考虑了水泵的模型,并在 FSC-VSPSU 抽水模式仿真模型上外加了功率控制环,可分析具有功率外环的 FSC-VSPSU 抽水模式的运行特性,作为机组的另一种补充控制方法。

通过建立上述 FSC-VSPSU 抽水模式下的仿真模型,可研究 FSC-VSPSU 在直接开度控制以及外加功率控制环两种控制方式下的运行特性。具体包括直接开度控制下机组定开度、变转速运行和定转速、变开度运行两种方式,以及加功率外环控制下机组定功率、变转速运行和定转速、变功率运行两种方式。可为实际 FSC-VSPSU 现场运行提供运行调试指导。

下面将介绍 FSC-VSPSU 总体结构及基本控制方法;然后详细建立抽水模式水泵的等效模型和调速器模型(直接开度控制以及外加功率控制环),并搭建 FSC-VSPSU 在抽水模式下的仿真模型;最后进行仿真分析,总结 FSC-VSPSU 在抽水模式的运行特性。

## 1 FSC-VSPSU 总体结构及基本控制

FSC-VSPSU 的总体结构及基本控制方法如图 1 所示,由上下水库、水泵水轮机、电机(发电机电动

机双工况)、电力电子变流器构成;控制系统主要由调速器控制、变流器控制、励磁控制构成。它具有以下两种工作模式:

1)发电模式:上水库的水放至下水库,驱动水泵水轮机旋转,水泵水轮机带动发电机旋转进行发电;再通过电力电子变流器进行电能变换并网,实现重力势能向电能的转换。

2)抽水模式:电力电子变流器从电网吸取电能,驱动电动机旋转,电动机带动水泵水轮机旋转,将下水库的水抽至上水库,实现电能向重力势能的转换。

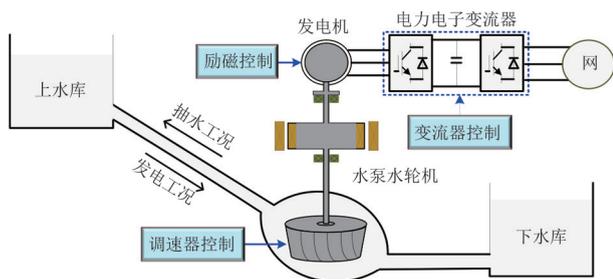


图 1 FSC-VSPSU 总体结构及控制

所做研究的目的是对 FSC-VSPSU 抽水模式进行仿真建模和运行特性分析,下面将详细介绍。

## 2 抽水模式下 FSC-VSPSU 建模

### 2.1 水泵模型

当 FSC-VSPSU 处于抽水模式时,通常采用快速转速控制方法,即:变流器控制转速,调速器控制功率或者调速器根据最优运行曲线直接给定导叶开度指令。此外,对于励磁控制,其与发电模式保持一致,均用于维持机端电压的稳定。对于变流器控制,其与发电模式的快速转速控制逻辑一致,均为网侧变流器控制直流侧电压,机侧变流器控制机组转速和无功功率。抽水模式与发电模式在建模上最大的不同之处在于水泵模型的建立,如图 2 所示。

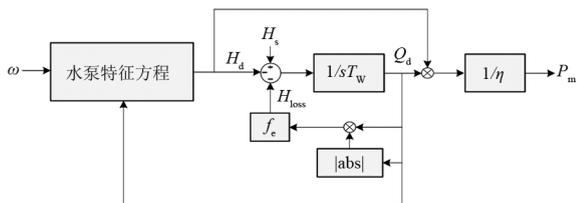


图 2 水泵等效模型

图中: $H_s$  为水泵初始扬程; $H_d$  为水泵动态扬程; $H_{loss}$  为水泵损失扬程; $T_w$  为水锤效应时间; $Q_d$  为水泵动态流量; $\eta$  为水泵抽水效率。水泵特征方程为

$$H_d = a_0 \omega^2 + a_1 \omega |Q_d| + a_2 Q_d^2 \quad (1)$$

式中: $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  为水泵的特征参数,与水泵的本质特征相关,可通过曲线拟合得到; $f_e$  为总的损耗系数,如式(2)所示。

$$f_e = (y_{\max} - y) / y \quad (2)$$

式中: $y_{\max}$  为导叶的最大开度; $y$  为导叶的实际开度。可见,水泵等效模型中,开度的影响是通过总的损耗系数  $f_e$  体现的,开度的变化会使得总的损耗系数  $f_e$  改变。当导叶开度全开时 ( $y = y_{\max}$ ),总损耗系数  $f_e$  最小为 0;当导叶开度最小时, $f_e$  最大且趋近于无穷大。

### 2.2 调速器模型

调速器等效模型如图 3 所示。其由控制系统、伺服系统以及第 2.1 节介绍的水泵模型 3 部分构成。抽水模式状态下,为了简化控制方法,机组常采用直接开度控制方式,当需要增加抽水功率时,增大开度,相反当需要减少抽水功率时,减小开度。这种控制方式虽然方便工程现场进行功率调节,但是不能对功率进行精确的控制。若需要精确控制抽水的功率大小,则需要外加功率控制环,可由 PI 控制器实现。

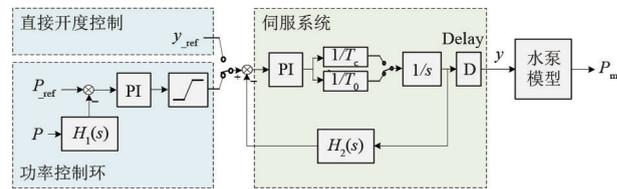


图 3 调速器等效模型

其中, $H_1(s)$  和  $H_2(s)$  分别为:

$$H_1(s) = \frac{1}{1 + sT_R} \quad (3)$$

$$H_2(s) = \frac{1}{1 + sT_P} \quad (4)$$

式中: $T_R$  为采样环节时间常数; $T_P$  为液压系统功率延时时间常数。

## 3 抽水模式下 FSC-VSPSU 仿真分析及运行特性

下面搭建了 FSC-VSPSU 抽水模式仿真模型,通过仿真分析研究机组在直接开度控制与外加功率外环控制下的运行特性。

### 3.1 直接开度控制下的运行特性

当使用定开度、变转速运行方式时,相关的机组

转速与功率输出仿真结果如图 4 所示。其中图 4(a) 为机组转速特性,机组的参考转速如红线所示,初始转速设置为 1000 r/min,在 2 s 时转速逐渐升高,在 8 s 时升高至 1060 r/min;机组的实际转速如蓝线所示,其能够对转速参考值进行很好的跟踪。图 4(b) 为机组输出功率特性,当转速升高时,机组输出功率(水泵工况功率为负)也相应地增高,符合实际功率输出规律,也验证了上述水泵模型的正确性。

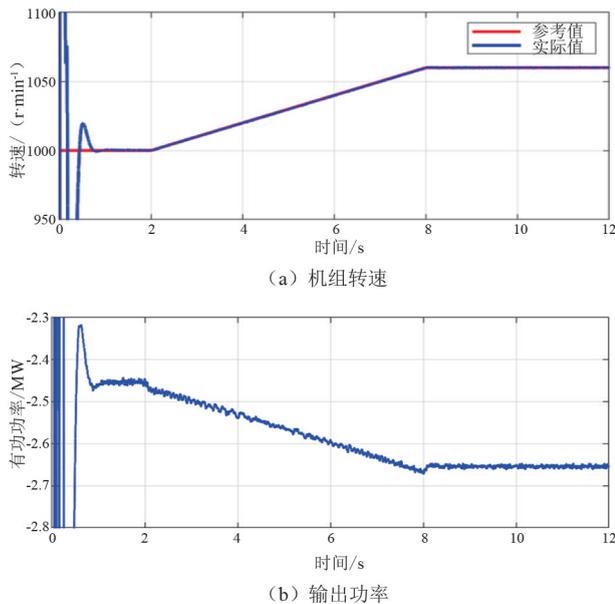


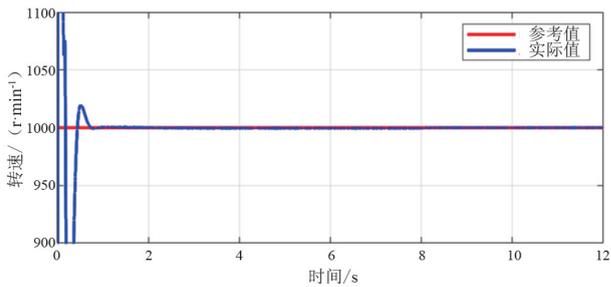
图 4 定开度、变转速下机组的转速与输出功率

当使用定转速、变开度运行方式时,相关的机组转速与功率输出仿真结果如图 5 所示。其中图 5(a) 为机组转速特性,机组的参考转速如红线所示,参考转速设置为 1000 r/min;机组的实际转速如蓝线所示,其能够对转速参考值进行很好的跟踪。图 5(b) 为机组输出功率特性,当初始开度设置为 40%,在 2 s 时逐渐线性升高,在 8 s 时升高到 64%,机组输出功率(水泵工况功率为负)随开度的变大相应地增高。

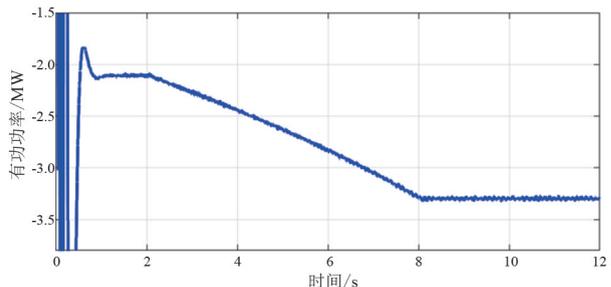
### 3.2 外加功率外环控制下的运行特性

当使用定功率、变转速运行方式时,相关的机组转速、开度信号及水泵功率仿真结果如图 6 所示。其中图 6(a) 为机组转速特性,机组的参考转速如红线所示,初始转速设置为 1000 r/min,在 2 s 时转速逐渐升高,在 8 s 时升高至 1060 r/min;机组的实际转速如蓝线所示,其能够对转速参考值进行很好的跟踪。图 6(b) 为开度信号,由于施加了功率外环维持水泵功率不变,因此机组开度会随着转速的升高而降低,从而使得水泵功率能够很好地跟踪设定值

-2 MW,如图 6(c)所示。

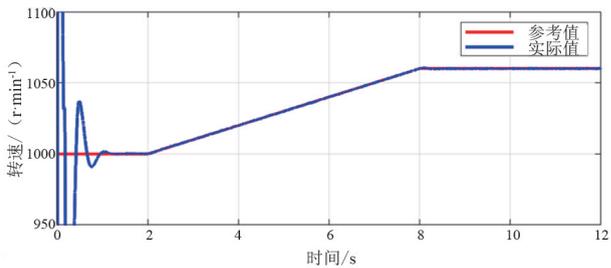


(a) 机组转速

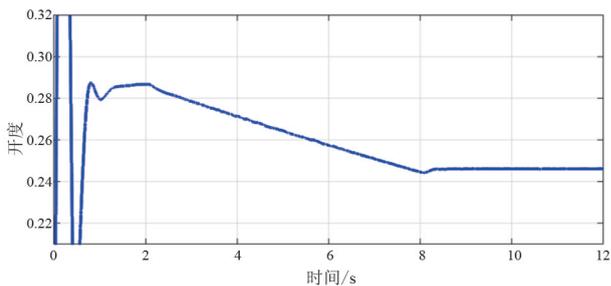


(b) 输出功率

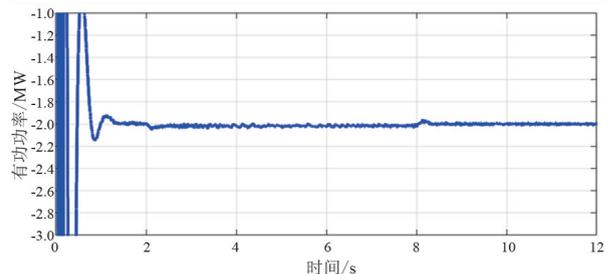
图 5 定转速、变开度下机组的转速与输出功率



(a) 机组转速



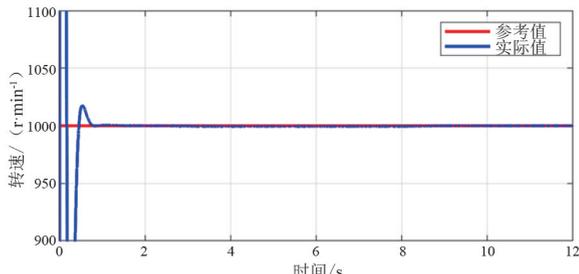
(b) 开度信号



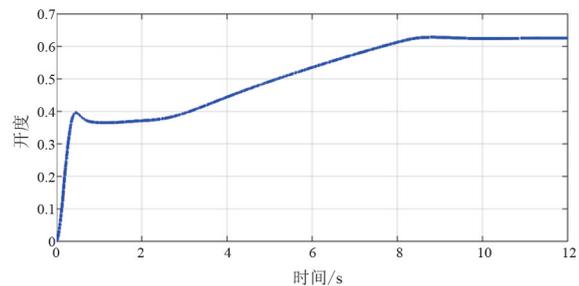
(c) 水泵功率

图 6 定功率、变转速下机组转速、开度信号及水泵功率

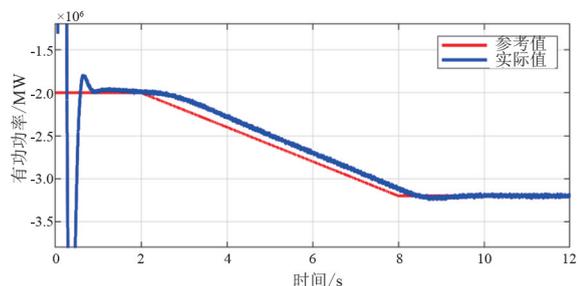
当使用定转速、变功率运行方式时,相关的机组转速、开度信号及水泵功率仿真结果如图 7 所示。其中图 7(a)为机组转速特性,机组的参考转速如红线所示,设置为 1000 r/min;机组的实际转速如蓝线所示,其能够对转速参考值进行很好的跟踪。图 7(b)为开度信号,由于功率参考值在 2 s 时开始线性增长,加之转速被控制恒定,因此开度随着功率参考值的增加而增加。水泵功率如图 7(c)所示,可见水泵实际功率大小能够与参考值保持一致,但是有一定的时延,这是由于调速系统中的液压装置和其他环节具有一定的时延造成的,与实际情况一致。



(a) 机组转速



(b) 开度信号



(c) 水泵功率

图 7 定转速、变功率下机组转速、开度信号及水泵功率

### 4 结 论

上面建立了 FSC-VSPSU 抽水模式模型,详细包括了水泵的建模以及调速器的建模,并搭建了相应的仿真模型,能够为分析 FSC-VSPSU 实际机组在抽 (下转第 80 页)

下,单个 4 MW 方阵的工频接地电阻值为 3.88  $\Omega$ ,满足光伏电站工频接地电阻小于 4  $\Omega$  的要求。海水、淤泥由于具有较强的散流能力,可大大降低工频接地电阻,随着厚度增加接地电阻下降明显。光伏电站装机规模越大,管桩数量越多,接地电阻越小。由于管桩间距固定而桩长增加将导致桩端散流时屏蔽效应增大,故桩长增加工频接地电阻增大。

管桩长度、管桩数量和海水深度的增加均可降低冲击接地电阻。其中海水的影响最大,随着海水深度增加,冲击接地电阻快速下降。落潮地面裸露时,冲击接地电阻值较大,在管桩桩长为 6 m,桩径为 0.3 m,淤泥层厚度为 0 m,预应力管桩电阻率为 200  $\Omega \cdot \text{m}$ ,砂石层电阻率为 1500  $\Omega \cdot \text{m}$  条件下,当支架数量达到 16 组时,冲击接地电阻小于 10  $\Omega$ 。

对于十万千瓦级装机容量的潮间带海上光伏项目,其管桩数量是所建模型的几十、数百倍,利用预应力管桩做自然接地体,其工频接地电阻和冲击接地电阻将小于上述计算值。所采用的仿真手段得到的海水深度、淤泥层厚度、装机规模以及桩长对海上光伏项目工频接地电阻和冲击接地电阻的影响规律,对同类项目接地设计具有一定的参考意义。未来在潮间带开展光伏建设,可根据光伏阵列设计方

(上接第 16 页)

水模式下所出现的问题以及工程调试提供一套仿真工具。通过仿真分析能得到以下结论:

- 1) 机组使用直接开度控制,在定开度、变转速运行方式时,机组转速越大,抽水功率越大;
- 2) 机组使用直接开度控制,在定转速、变开度运行方式时,机组开度越大,抽水功率越大;
- 3) 机组使用外加功率外环控制,在定功率、变转速运行方式时,机组的开度会随着转速的升高而降低,以维持恒功率运行;
- 4) 机组使用外加功率外环控制,在定转速、变功率运行方式时,机组的有功功率跟踪存在延时,且抽水功率越大,开度越大。

#### 参考文献

- [1] 史华勃,王渝红,滕予非,等.全功率变速抽水蓄能机组快速功率模式小信号建模[J].电力系统自动化,2022,46(4):162-169.
- [2] 陈刚,丁理杰,韩晓言,等.抽水蓄能在四川电网的应用前景展望[J].四川电力技术,2022,45(2):1-6.

案、实测土壤电阻率等对预应力管桩做自然接地体的合理性进行验证。

#### 参考文献

- [1] 华林青.浅析一种新型水上光伏电站防雷接地方法[J].太阳能,2019(6):52-54.
- [2] 梁坤.混凝土导电特性及其影响因素试验研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [3] 中国电力企业联合会.交流电气装置的接地设计规范:GB/T 50065—2011[S].北京:中国计划出版社,2011.
- [4] 夏能弘,陆衡,陆嘉骁.考虑潮间带接地环境的海上风机一体化电磁暂态模型[J].电瓷避雷器,2020(4):46-53.
- [5] 中国电力企业联合会.光伏发电站设计规范:GB 50797—2012[S].北京:中国计划出版社,2012.
- [6] 张敏,曹晓斌,李瑞芳,等.输电线路杆塔接地极冲击接地电阻特性分析[J].电瓷避雷器,2012(4):5-9.

#### 作者简介:

邓 鹏(1981),男,高级工程师,从事新能源设计工作;  
周 秦(1980),男,高级工程师,从事新能源管理工作;  
宋兆非(1988),男,工程师,从事新能源设计工作;  
何 垒(1985),男,工程师,从事新能源设计工作。

(收稿日期:2023-08-03)

- [3] 周文越,史华勃,陈刚.全功率变速抽水蓄能机组保护配置及整定方法[J].四川电力技术,2023,46(2):28-31.
- [4] PAN Pengyu, DING Lijie, SHI Huabo, et al. Multi-mode simulation modeling of full-size variable speed pumped storage system including the complete unit links [C]. 2023 Panda Forum on Power and Energy (PandaFPE), Chengdu, China, 2023:13-17.
- [5] 徐斌,金龙云,熊健,等.抽水蓄能电站全功率变频控制策略[J].电力电子技术,2020,54(7):33-35.
- [6] 畅欣,韩民晓,郑超.全功率变流器可变速抽水蓄能机组的功率调节特性分析[J].电力建设,2016,37(4):91-97.

#### 作者简介:

潘鹏宇(1993),男,博士,工程师,研究方向为全功率变速抽水蓄能机组优化控制、电力系统宽频带阻抗测量;  
史华勃(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为抽水蓄能发电技术、电力系统分析计算与稳定控制等;  
陈 刚(1985),男,博士,正高级工程师,研究方向为电力系统分析与控制;  
丁理杰(1981),男,博士,正高级工程师,研究方向为大电网安全稳定分析与控制。(收稿日期:2023-08-07)