

文章编号: 1673-095X(2020)04-0016-06

柔性直流系统中变速抽蓄机组与风电的 协调控制策略研究

李 偲, 郗文康, 张德隆, 张 妍, 张 浩, 李美成
(华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 柔性直流输电逐渐成为当前输送新能源最具优势的输电方式之一,同时也对电力系统的稳定运行提出了更高的要求.为了解决柔性直流系统中新能源固有的波动性带来并网冲击的问题,考虑接入变速抽蓄机组平抑风电出力波动,保证柔性直流输电送出功率的稳定性.为此,本文首先介绍了变速抽水蓄能机组的基本原理;其次构建了风电机组、变速抽蓄机组与柔性直流联合系统的模型,并提出了利用变速抽水蓄能机组平抑风电波动的协调控制策略,最后,对变速抽蓄机组的响应能力及其与风电系统的协调控制能力进行了仿真分析.结果表明变速抽蓄机组具有较高的灵活性和可靠性,是保障电网安全、稳定运行的可靠工具,也验证了本文所提协调控制策略的有效性.

关键词: 变速抽水蓄能机组; 风电; 柔性直流; 协调控制策略; 平抑波动

中图分类号: TM612 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1673-095X.2020.04.004

Research on coordinated control strategy of variable speed pumping unit and wind power in flexible DC system

LI Cai, XI Wen-kang, ZHANG De-long, ZHANG Yan, ZHANG Hao, LI Mei-cheng
(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Flexible DC transmission has gradually become one of the most advantageous transmission methods for delivering new energy, and it also puts forward higher requirements for the stable operation of the power system. In order to solve the problem of grid-connected impact caused by the inherent volatility of new energy in the flexible system, consider shifting the variable-speed pumping unit into the system to stabilize the wind power output fluctuation and ensure the stability of the flexible DC transmission power. Based on the above problems, this paper first introduces the basic principle of the variable speed pumped storage unit; Secondly, this paper constructs a model of wind turbine, variable speed pumping unit and flexible DC combined system, and proposes a coordinated control strategy to stabilize wind power fluctuations by using variable speed pumped storage units; Finally, the responsiveness of the variable speed pumping unit and its coordinated control with the wind power system are simulated and analyzed. Research shows that the variable speed pumping unit has high flexibility and reliability, and is an effective tool to ensure safe and stable operation of the power grid. The results show that the variable speed pumping unit has high flexibility and reliability, and is a reliable tool to ensure the safe and stable operation of the power grid. It also verifies the effectiveness of the coordinated control strategy proposed in this paper.

Key words: variable speed pumped storage unit; wind power; flexible DC; coordinated control strategy; smooth fluctuation

目前,新能源发电增加了电力系统调节负担,传统交流电网难以负担超高占比的新能源外送,给新能源的外送与消纳带来困难^[1].近年直流输电尤其是柔性直流输电发展迅速,它是一种更加灵活、环保和经济的输电方式,在大规模新能源输送、分布式发

电、孤岛及城市电网供电等领域有独特优势,成为大规模新能源发电外送及消纳的首选^[2-4].

但柔性直流输电故障时缺乏快速的备用功率支援、新能源大规模发电时弃风弃光量上升、发电量与负荷不能同时匹配等问题^[5]对电网稳定运行也带来

收稿日期: 2019-11-01.

基金项目: 国家自然科学基金(71974055);北京节能与电力技术开发基金会项目(J2019001);国网公司科技项目(52010118000M).

作者简介: 李 偲(1996—),女,硕士研究生,E-mail:438895204@qq.com.

通讯作者: 张 妍(1975—),女,副教授,硕士生导师.

一定风险.作为目前公认的电力系统中最可靠、最经济、最大容量以及技术最成熟的储能装置,抽水蓄能电站在削峰填谷、平滑可再生能源并网冲击功率、调频调相、事故备用等方面具有较高的优越性^[6-7].在电力系统中配置一定装机容量的抽水蓄能系统,是解决当前大规模新能源为负荷供电带来系列问题的优异选择.

目前,抽水蓄能电站相关技术不断发展,其中最瞩目的成果便是抽蓄机组的换代升级.传统定速机组运行于恒速恒频方式,存在转速不可随时调整以迎合电网需求等劣势^[8].变速抽蓄机组是一种高效先进的调峰调频电源,它能实现变速恒频运行,平滑启动,快速调节有功无功、可以更大程度上减小新能源电源对系统的冲击,响应时间快,可为电网安全稳定运行提供更有力的保障^[9-10].

我国的抽水蓄能电站目前采用的还几乎全是定速机组或者通过改变极对数方式的有极调速机组^[11],变速抽蓄机组的应用研究还较少,变速抽蓄机组在柔直系统中的功率调节能力研究也较少见.针对上述柔性直流输电及抽水蓄能存在的问题,本文构建了变速抽蓄机组与包含风电机组在内的柔性直流联合系统的模型,提出了协调控制策略并进行了仿真验证,对变速抽水蓄能机组在联合系统中的功率调节能力进行了分析,为今后的相关研究提供借鉴.

1 变速抽水蓄能机组结构及数学模型

1.1 变速抽水蓄能机组的结构

变速抽蓄机组与普通定速抽蓄机组的原理类似,区别在于发电电动机的转子结构及励磁系统^[12]:变速抽蓄机组于转子线槽中布置三相交流励磁绕组,其励磁系统则由交流变频装置代替了常规定速机组的普通可控硅直流整流装置,变速抽蓄机组可采用电力电子器件实现转子的交流励磁.水泵水轮机自带机械调速器,是系统的原动机或负载,叶轮顺向转动时使水轮机带动发电机,逆向转动时电动机带动水泵转动.控制装置则用于产生功率和速度给定信号,分别用于控制变频器和导叶.变速抽蓄机组的原理示意图如图1所示.

在变速抽蓄机组正常工作时,转子线槽中的励磁绕组通过三相交流电,也会产生一个相对于转子转动的旋转磁场.由于需要保持定子磁场频率为50 Hz不变,在转子旋转频率变化的情况下,只需调节输入转子励磁电流的频率即可使变速抽蓄机组恒频运行^[13].

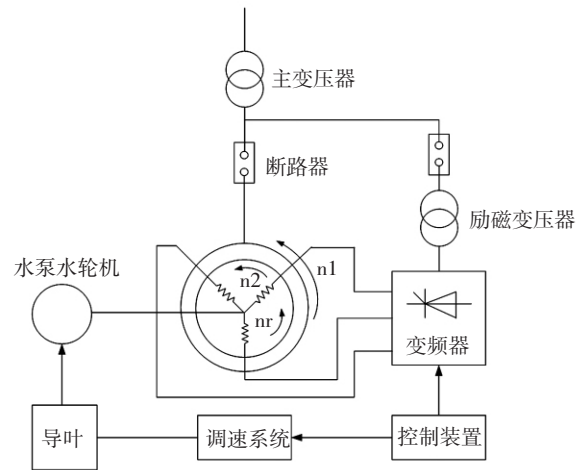


图1 可变速抽蓄机组的原理图

Fig.1 Schematic diagram of variable speed pumping unit

根据能量转换定律可知,定子磁场的转速为转子机械转速与转子旋转磁场转速之和.而此时转子旋转磁场的相对转速与励磁电流频率成正比关系,如公式(1~3)所示.综上,调节 f_r 即可达到变速恒频的目的.具体公式如下所示:

$$f_1 = f_2 + f_r \quad (1)$$

$$n_1 = n_2 + n_r \quad (2)$$

$$n_r = 60 f_r / p \quad (3)$$

式中, f_1 定子磁场频率,为50 Hz; f_2 为转子旋转频率(Hz); f_r 为转子励磁电流的频率(Hz); n_1 为定子磁场的转速(r/min); n_2 为转子机械转速(r/min); n_r 为转子旋转磁场转速(r/min); p 为电机极对数.

1.2 变速抽水蓄能机组的数学模型

由1.1小节可知,变速抽水蓄能系统由变速机组、水泵水轮机、调速系统、断路器等部分组成,变速抽蓄机组采用的是双馈电机,与双馈式风电机组数学模型类似,其研究理论已较为成熟,在这里不做赘述,着重对调速系统及水泵水轮机的数学模型进行分析与研究.

调速系统包主要包括调速器和随动系统.首先,一般通过改变转速来调节水泵水轮机的输入功率,具体实现方法是采用含PID的调速器,即含比例-积分-微分环节的控制,该PID控制器通过转速偏差不断进行调整与控制实现目标,可靠性比较高.调速器后面接的是随动系统,因为必须要考虑到波动工况下液压环节的动作速度过快使幅度超过到全行程位置的情况^[14].调速器与电液随动型模型的具体框如图2.其中, T_r 是继电器时间常数,该模型包括死区、随动系统的速率限制和饱和环节,分别用来处理误差值及限制幅值,可靠性较好.

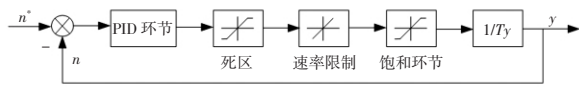


图 2 调速系统控制框图

Fig.2 Control block diagram of the speed control system

根据发电和电动两种工况,可逆式水泵水轮机可分别运行于水轮机和水泵模式,两种运行工况的数学模型并不相同.对于水轮机来说,目前包括经典、线性和非线性模型等集中数学模型,考虑到本文的实际情况,在这里采用更适用于扰动场景的水轮机的非线性数学模型^[5]:

$$\begin{cases} H = \frac{Q^2}{G^2} \\ \dot{Q} = \frac{1}{T_w} \left(1 - \frac{Q^2}{A_1 g^2} \right) \\ P_t = \rho g H Q \eta_t = 9.81 H Q \eta_t \end{cases} \quad (4)$$

式中, H 、 Q 、 G 分别为水头(m),流量(m^3/s)及导叶开度(mm); T_w 、 A_1 分别表示水流惯性时间常数、导叶系数; P_t 为水轮机功率(kW), ρ 、 g 、 η_t 分别为水的密度(kg/m^3)、当地重力加速度(m/s^2)及水轮机效率.

可逆式水泵水轮机运行于水泵模式时,根据水泵特性可拟合如下曲线^[6]:

$$\begin{cases} h = a_0 n_r^2 + a_1 n_r q + a_2 q^2 \\ h_d = h_s + h_l = h_s + f_c q^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中, a_0 、 a_1 、 a_2 均为曲线拟合系数且为常数; n_r 、 h 为水泵转速和扬程; h_d 、 h_s 、 h_l 分别为泵升过程所需总扬程、静扬程与损失扬程; f_c 为水泵摩擦系数.水泵机械功率也有如下公式:

$$P_m = \rho g H Q / \eta_p = 9.81 H Q / \eta_p \quad (6)$$

式中, η_p 为水泵效率, P_m 是水泵功率,其余均与水轮机功率公式保持一致.

2 联合系统变流器的控制策略

变速抽蓄机组、风电机组及柔性直流系统变流器的控制策略均采用能量解耦的矢量控制方法.由于变速抽蓄机组与风电机组均采用的均为双馈电机,其本质是绕线式感性电机,所以控制方法与电机控制方法是相同的.目前主流控制策略包括矢量控制与直接转矩控制,由于直接转矩控制存在转矩脉动、调速范围受限、受时变参数影响等缺点,在这里采用适用范围广泛的矢量控制.而矢量控制根据依据其矢量定向的不同,又分为基于定子磁场定向、基于气隙磁场定向、基于转子磁场定向以及基于定子电压定向的矢量控制等矢量控制策略^[7],根据不同的应用场景,选择合适的矢量控制方法.本文中变速抽蓄机组、风电机组及柔性直流输电系统的变流器结构均为三相两电平电压源型变流器,所以控制方法均采用双闭环矢量控制.下面着重介绍变速抽蓄机组变流器的控制策略.

针对变速抽蓄机组的原理与特点,目前变流器拓扑结构主要有两电平、多电平、H桥级联、MMC 以及交-交型变流器等几种主流类型^[8],它们各有优势,适用场景不同.结合本文的情况,选择控制简单,技术成熟的两电平变流器,其拓扑结构如图 3 所示.

如图 3,两电平变流器由电压源型换流器、电容

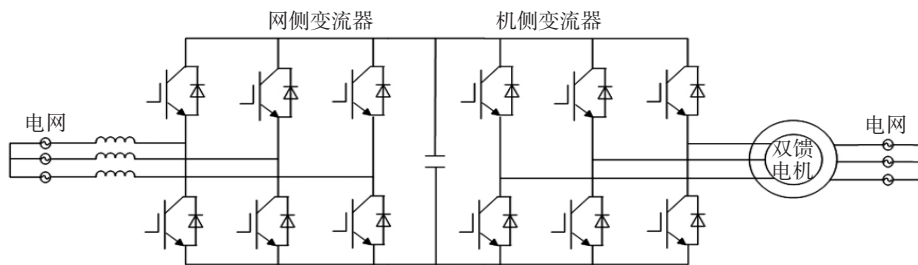


图 3 变速抽蓄机组两电平变流器拓扑结构图

Fig.3 Control block diagram of the speed control system

等部分组成.每个电压源型换流器由 3 个桥臂构成,每个桥臂由 2 个大功率全控开关器件与对应的反向并联的二极管组成.电容的作用除去储能外,还能够对电流突变进行缓冲,此外还需配备滤波器以保证电能质量.

为了便于区分,将两变流器分为机侧变流器和网侧变流器,机侧变流器连接双馈电机的转子侧,

网侧变流器从双馈电机定子侧连入电网,定、转子侧绕组可以同时向电网馈电.

对于机侧变流器,其控制目标是根据需求,向转子侧提供交流励磁电压幅值和相位,进而实现对双馈电机转速或有功的控制,此外还有对无功的控制,实现可变速抽蓄机组的稳定运行.矢量控制实现方法为基于定子电压定向矢量控制,即将定子电压矢

量定向在 d 轴,建立起在同步旋转坐标系下的方程. 控制变量是有功功率和电网电流,完成功率外环,电流内环的双闭环控制. 具体控制框如图 4.

根据图 4 分析得,机侧变流器的双闭环控制首先将有功、无功功率给定值 P_{ref} 和 Q_{ref} 分别与反馈功率 P 和 Q 进行比较,输出的差值经 PI 调节器调整后

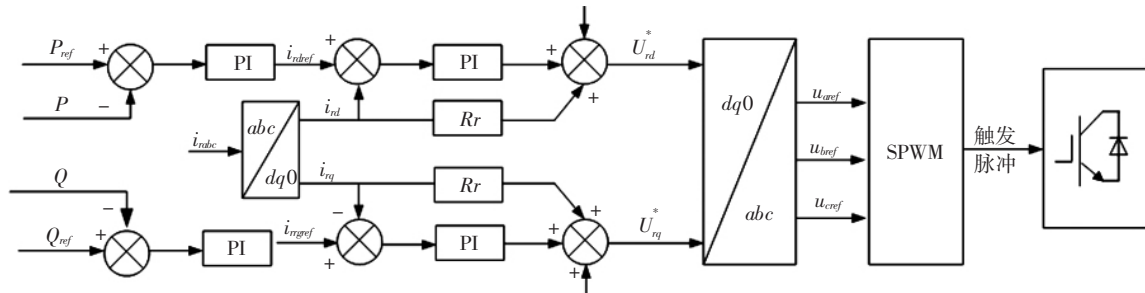


图 4 机侧变流器矢量控制框图

Fig.4 Vector control block diagram of the machine-side converter

输出电流 d 轴、q 轴分量参考值 i_{dref} 和 i_{qref} . 两个 d、q 轴参考值再分别与坐标变换后的反馈值 i_{rd} 、 i_{rq} 相比较,其差值经过 PI 调节器运算后输出两个电压补偿分量 Δu_{rd} 、 Δu_{rq} ,再与各自的电压补偿项相加减,得到转子电压参考值 u_{rd}^* 、 u_{rq}^* . u_{rd}^* 、 u_{rq}^* 再经过坐标变换,形成转子电压三相参考值 u_{abcref} ,最后经过 SPWM 脉宽调制生成触发脉冲控制机侧变流器的运行.

标除了维持直流母线电压恒定外,还需对网侧功率因数进行调节,进而实现对无功功率的间接控制. 利用的矢量控制方法为基于电网电压定向的矢量控制,即将电网电压矢量定向在 d 轴,同样需要建立起在同步旋转坐标系下的方程. 控制变量是直流电压和电网电流,从而完成电压外环,电流内环的双闭环控制. 具体控制框如图 5.

而对于变速抽蓄机组的网侧变流器,其控制目

网侧变流器的双闭环控制与机侧变流器的不同

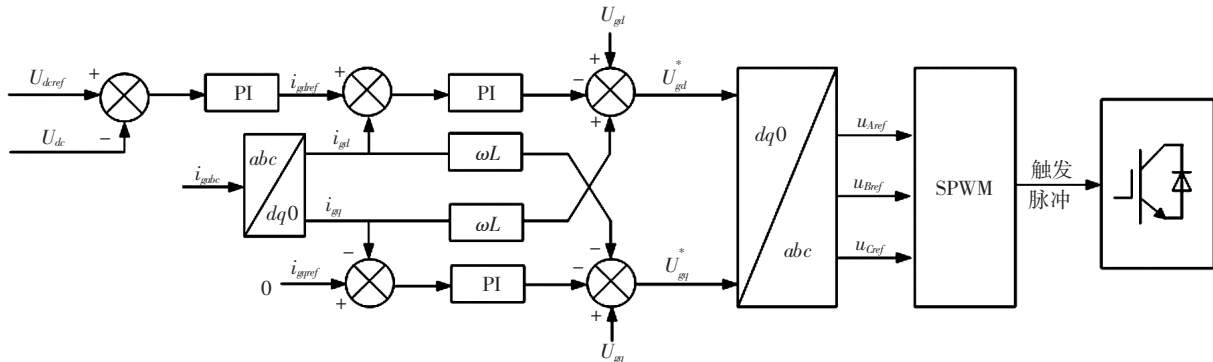


图 5 网侧变流器矢量控制框图

Fig.5 Vector control block diagram of the grid-side converter

之处在于控制参数的不同,给定值为直流电压 U_{dc}^{*ref} ,而为实现变速抽蓄机组的单位功率因数控制,设定定子侧无功功率的参考值为 0,其余均与机侧变流器类似,具体的公式推导也不再赘述.

既与抽蓄电站相连又同电网相连,又或许仅与电网相连^[8]. 为保障系统的稳定性,考虑将风电与抽水蓄能分别接入柔直电网,使得电能获得较高的利用效率与利益.

3 变速抽蓄机组与风电联合系统协同控制策略

联合系统遵循新能源尽量优先消纳的原则,首先由风电机组为柔直受端侧的负荷进行供电,变速抽蓄机组做为削峰填谷、负荷跟踪及快速功率备用支援的储能工具. 当风电机组因极端天气或意外因素发生有功功率下降或者在负荷用电高峰期,柔直输电系统迅速为负荷支撑功率,等变速抽蓄机组收到指令后,迅速运行至发电状态,利用上水库放水后

变速抽蓄机组与包含风电机组在内的柔直联合系统结构拓扑图如图 6 所示,该系统由风电场、抽水蓄能电站、柔性直流输电系统以及电网组成. 系统构成主要有三种方式:风电与抽蓄电站直接相连,或者

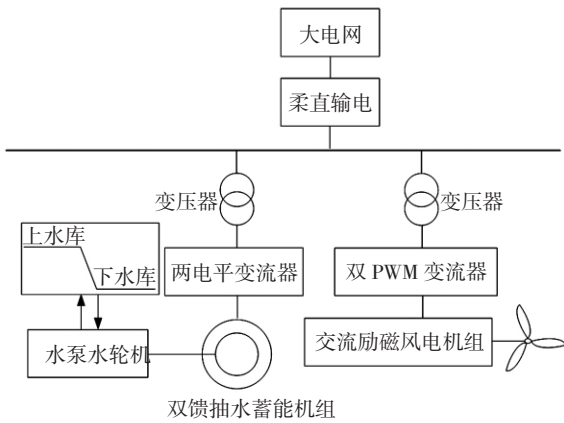


图 6 变速抽水蓄能机组与风电联合系统控制框图

Fig.6 Control block diagram of variable speed pumping unit and wind power combined system

产生的重力势能带动水轮机转动发电,切换其成为负荷的备用支撑.而当风电机组功率超出负荷需求或在负荷用电低谷期,将风电机组多余电能用于抽水蓄能电站的水泵,此时变速抽水蓄能机组处于抽水状态,下水库抽水将重力势能储存在上水库中.在这样往复循环的过程中,变速抽水蓄能机组输出或者吸收的功率可有效平滑风电机组带来的电能波动,通过合理配置使能源得到了充分有效的利用,实现了能量的转换储存以及电能的时间分配,并削弱了新能源对电网带来的运行风险.

如图 7 及公式所见,通过柔直系统稳定输出功率 P_{dc} 与风电出力 P_{wind} 的比较差值,变速抽水蓄能机组获取有功功率给定参考值 P_{ref} ,再与自身实时输出功率 P_{vspu} 比较得出需要调整的功率差额 P_{gen} ,若 P_{ref} 大于 0,则此时变速抽水蓄能机组处于发电工况,水轮机运行状态;若 P_{ref} 小于 0,则处于电动工况,水泵运行状态.

$$P_{ref} = P_{dc} - P_{wind} \quad (7)$$

$$P_{gen} = P_{ref} - P_{vspu} \quad (8)$$

随着风电机组的出力波动,变速抽水蓄能机组能够根据指令快速调节电机有功及无功输出,并能根据水头变化迅速调整电机转速,优化电机效率和调整水泵水轮机出力,平抑风电波动.交流励磁系统无功调节特性与常规机组相同,具备提高机组和电力系

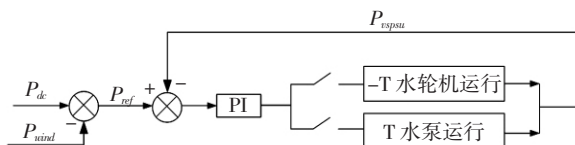


图 7 变速抽水蓄能机组协调控制策略

Fig.7 Coordinated control strategy for variable speed pumping unit

统稳定性的调节规律和功能.它使得原本具有波动性的间歇电源转换为可控可调的稳定电源,从而成为保证电网安全、稳定、经济运行的有力工具.

4 算例分析

为验证本文提出变速抽水蓄能机组模型、变流器控制策略及联合系统协调控制策略的正确性,基于 MATLAB/Simulink 搭建了如图 8 所示仿真.该仿真系统包括装机容量均为 100 MW 的变速抽水蓄能机组 G1 及风电机组 G2,柔性直流母线电压为 200 kV,线路输电长度为 100 km,经两电平变流器接入电网,并为柔直系统受端侧的 50 MW 负荷供电.

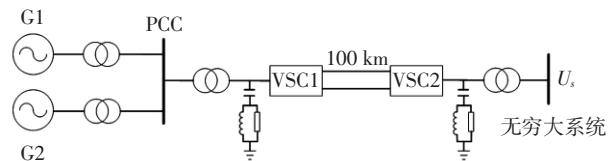


图 8 变速抽水蓄能机组与柔直联合系统仿真等效拓扑图

Fig.8 Simulation equivalent topology diagram of variable speed pumping unit and flexible DC combined system

模拟风电机组产生波动的情况,将短时间内的风电有功波动近似设置为阶跃变化,观察变速抽水蓄能机组在联合系统中的功率调节与平抑风电波动的能力.

联合系统中总是由风电机组优先为 50 MW 的负荷供电,由图 9(a)可见,当遇到意外天气原因导致风电发出有功功率跌落至 20 MW 时,变速抽水蓄能机组接收到指令后,几乎是同时迅速切换至发电状态,提供 30 MW 的功率差额供负荷用电. 2.9 s 左右风电机组功率小幅上升至 40 MW,变速抽水蓄能机组仍能迅速追踪风电出力波动情况,送出负荷所需功率,使柔直系统送出有功一直保持在负荷所需的 50 MW,由于变速抽水蓄能机组定子电流与有功输出密切相关,因此有功随定子电流变化而变化,此时系统达到新的功率平衡状态.

而当风电机组输出功率超出负荷需求时,如图 10(a)所示,1.1 s 时风电机组出现电能超出负荷需求的情况,规定变速抽水蓄能机组送出电能方向为正,吸收电能方向为负.此时多余电能输送给变速抽水蓄能机组,机组迅速切换至抽水状态消耗掉多余电能,柔直系统输出功率保持不变.在风电机组功率有小幅跌落,变速抽水蓄能机组迅速由 40 MW 调整至 20 MW,保障整个系统的平稳运行.与发电工况类似,通过仿真结果同样可以看到输出有功随定子电流变化情况.

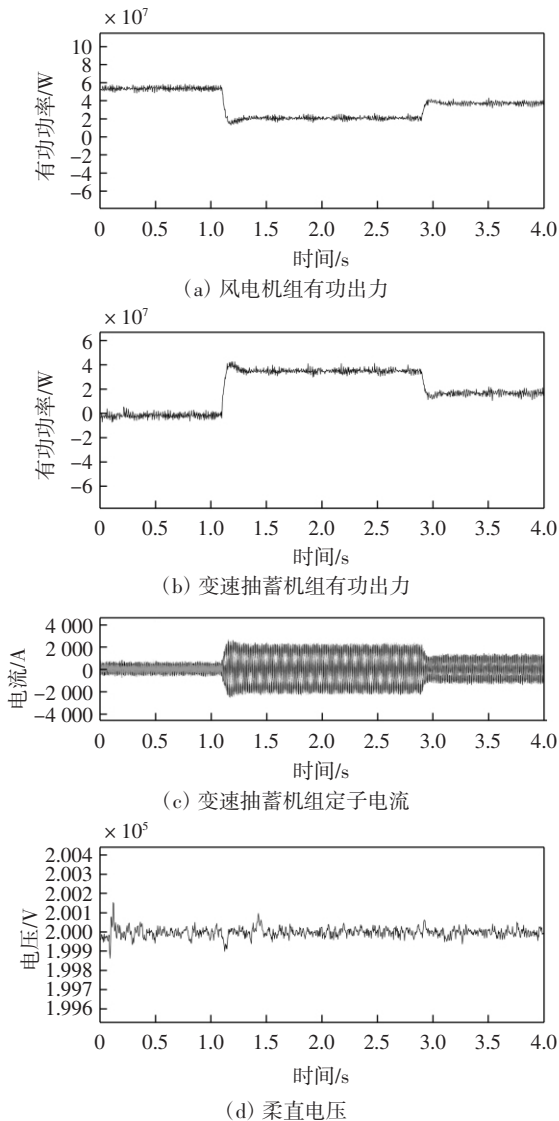


图9 变速抽蓄机组发电工况仿真图

Fig.9 Simulation diagram of power generation conditions of variable speed pumping unit

可以发现,不论是在发电还是电动状态下,柔直电压的波动幅度保持在0.1%的范围内,系统波动较小,稳定性较高.如图9(c)与图10(c)所示,表明了变速抽蓄机组强有力的功率调节及平抑波动能力,同时也表明了协调控制策略的正确性与有效性.

5 结论

在变速抽蓄机组与包含风电机组在内的柔直联合系统中,当柔直系统供电侧的风电机组产生波动后,会对受端负荷功率需求和系统稳定性造成影响,而变速抽蓄机组可以平滑新能源并网冲击功率,是电力系统优良的削峰填谷工具.

本文通过对变速抽蓄机组数学模型、变流器控

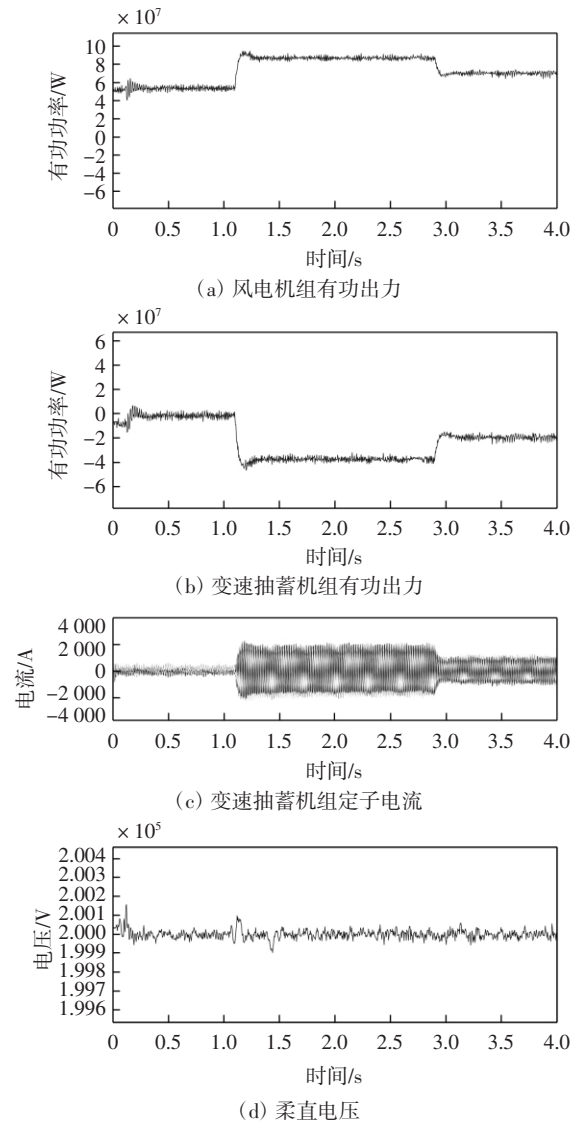


图10 变速抽蓄机组电动工况仿真图

Fig.10 Simulation diagram of electric working condition of variable speed pumping unit

制策略以及联合系统协调运行策略的研究,建立了包含风电机组、变速抽蓄机组在内的柔性直流联合系统的仿真模型.仿真结果表明,在风电出力产生波动后,变速抽蓄机组能跟踪风电机组功率波动情况,迅速切换到发电或抽水状态,为风电机组功率“填谷”“削峰”,迅速提供后备功率或吸收多余电能,具有较强较快的功率调节能力,使得联合系统高效、稳定运行.但是,由于本文仿真结果单位为秒级,所以将风速模型近似设置为阶跃式,与实际风速模型略有差异;以及考虑到本文研究的着重点是对变速抽蓄机组、风电机组的联合运行并通过柔性直流送出的新搭配,因此在控制策略的选取上保守采用了经典结构与经典策略,后续在进一步的研究中将作深入改进.

(下转第32页)

表 3 各算法 RMSE 和 MAE
Tab.3 RMSE and MAE for the each algorithm

	RMSE	MAE
EMD-ARMA 算法	2.590 3	1.984 2
本文算法	1.800 0	1.616 8

4 结 论

本文算法利用 EMD 分解算法,对数据样本进行二次处理,对分解得到 IMF 分量进行判别.对低频趋势型的 IMF 分量进行高阶多项式拟合,对高频平稳时间序列型的 IMF 分量进行 ARMA 拟合,综合各 IMF 分量得到预测结果.该算法的优点在对于历史数据样本容量的要求很低,由于具体问题具体分析的原因,预测结果也更为准确.

参 考 文 献:

[1] 谢武明,李 俊.基于 BP 神经网络和遗传算法的污水处理厂电耗预测[J].水电能源科学,2018,36(8):202-204.
 [2] 段冠囡,王岳人.超高层建筑暖通空调能耗精准预测仿真[J].计算机仿真,2018,35(12):317-320,379.
 [3] 黄荣庚,龙 静.基于 ARMA 模型的地铁站环控系统能

耗预测[J].制冷学报,2019,40(1):88-93.

[4] 赵建忠,徐廷学.基于小波分析的导弹装备备件需求组合预测[J].电子学报,2014,42(3):417-423.
 [5] 曾德明.电力负荷的预测方法的建模与仿真[J].计算机仿真,2011,28(12):331-334.
 [6] Zhao W J, Cao T H, Li Z L, et al. Comparison of IDW, cokriging and ARMA for predicting spatiotemporal variability of soil salinity in a gravel-sand mulched jujube orchard[J]. Environmental monitoring and assessment, 2019,191(6):376-381.
 [7] 邱 翔.分层流动中湍流结构和湍流逆梯度输运特性研究[D].上海:上海大学,2006.
 [8] 傅书勇,孙淑军.我国卫生总费用与 GDP 关系的研究——基于回归与 ARMA 模型的实证分析[J].南京中医药大学学报:社会科学版,2011,12(2):105-108.
 [9] 撒占友,刘 岩,刘 杰.基于 EMD-ARMA 的矿井瓦斯涌出量预测[J].煤矿安全,2016,47(7):174-176,181.
 [10] 赵建忠,徐廷学.基于小波变换和 GM-ARMA 的导弹备件消耗预测[J].北京航空航天大学学报,2013,39(4):553-558.
 [11] 舒服华.基于 EMD-ARMA 的福建省 GDP 增长速度预测[J].三明学院学报,2018,35(5):12-16.
 [12] 王伟国,支小军.基于 EMD-ARMA 模型的我国棉花价格预测方法研究[J].新疆农垦经济,2012(11):14-16.

(上接第 21 页)

参 考 文 献:

[1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):1-8.
 [2] 姚为正,邓祥纯,易映萍,等.基于 dq0 同步坐标的柔性直流输电控制策略及仿真研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(22):71-76.
 [3] 马为民,吴方劼,杨一鸣,等.柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J].高电压技术,2014,40(8):2429-2439.
 [4] 白雪松,袁绍军,王 轶,等.柔性直流输电技术综述[J].电气应用,2015(21):78-83.
 [5] 汤广福,贺之渊,庞 辉,等.柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J].电力系统自动化,2013(15):3-14.
 [6] 畅 欣,韩民晓,郑 超,等.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.
 [7] Zhang N, Kang C, Kirschen D S, et al. Planning pumped storage capacity for wind power integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013,4(2):393-401.
 [8] 施一峰,高苏杰,常玉红,等.变速抽水蓄能机组交流励磁系统功率拓扑结构浅析[J].水力发电,2018,44(4):77-85.

[9] 蔡卫江,许 栋,徐宋成,等.可变速抽水蓄能机组调速器的控制策略[J].水电与抽水蓄能,2017(2):81-85.
 [10] 王婷婷,赵杰君,王朝阳,等.我国电网对抽水蓄能电站变速机组的需求分析[J].水力发电,2016,42(12):107-114.
 [11] 简优宗,衣传宝,杨合民,等.大型抽水蓄能电站交流励磁机组控制策略研究[J].水力发电,2015,41(4):53-55.
 [12] 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.
 [13] 周 平,杨 伟,等.可变速发电电动机交流励磁技术路线探讨[J].水电站机电技术,2014(2):27-29.
 [14] 高 磊,张成立,秦正飞,等.基于 Simulink 的水轮机调节系统仿真中水轮机模型研究[J].水电与抽水蓄能,2015,1(6):51-55.
 [15] Demello F P, Koessler R J, Agee J, et al. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992,7(1):167-179.
 [16] 魏守平.水泵水轮机调节系统仿真[M].湖北:华中理工大学出版社,2011.
 [17] 赵 新.双馈型风力发电机控制策略及低电压穿越技术研究[D].北京:北京交通大学,2010.
 [18] 李 强,袁 越,李振杰,等.考虑峰谷电价的风电-抽水蓄能联合系统能量转化效益研究[J].电网技术,2009,33(6):13-18.