

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210486

柔性直流输电系统的变速抽水蓄能机组直流电压 辅助控制策略

陈磊¹, 庄俊², 王志远¹, 吴玮¹, 谢宁宁³, 李辉³

(1. 河北丰宁抽水蓄能有限公司, 河北 承德 068350; 2. 中国电力科学研究院有限公司(江苏省储能变流及应用工程技术研究中心), 江苏 南京 210003; 3. 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)

摘要: 柔性直流输电是新能源并网消纳的主要输电形式。由于新能源出力波动性会导致柔性直流输电系统的直流电压波动, 影响其安全稳定运行。为了有效抑制柔性直流输电系统中直流电压波动, 提出变速抽水蓄能机组直流电压辅助控制策略。首先建立了变速抽水蓄能机组、四端柔性直流电网、风电场及光伏电站的仿真模型。其次, 以直流电压偏差乘以相应系数作为变速抽水蓄能机组有功功率参考值微增量, 且通过低通滤波器滤去直流电压稳态分量对直流电压辅助控制的影响, 提出基于直流电压辅助控制的变速抽水蓄能机组有功功率控制策略。最后, 以变速抽水蓄能机组电动和发电工况为例, 对变速抽水蓄能机组抑制柔性直流输电系统直流电压波动能力进行仿真, 并传统直接功率控制策略进行对比分析。仿真结果表明新能源出力波动引起的直流电压波动频率集中在 10 Hz 以下, 且所提变速抽水蓄能机组控制策略可以有效抑制柔性直流系统直流电压波动。

关键词: 变速抽水蓄能机组; 柔性直流输电系统; 辅助电压控制; 可再生能源并网

Auxiliary control strategy of DC voltage for variable speed pumped storage units in an HVDC transmission system

CHEN Lei¹, ZHUANG Jun², WANG Zhiyuan¹, WU Wei¹, XIE Ningning³, LI Hui³

(1. Hebei Fengning Pumped Storage Co., Ltd., Chengde 068350, China; 2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd. (Jiangsu Research Center of Energy Storage Converter and Application Engineering Technology), Nanjing 210003, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission and Distribution Equipment and System Safety and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: HVDC transmission is the main transmission form for grid connection and consumption of new energy. Because of the fluctuation of new energy output, the DC voltage fluctuation of an HVDC transmission system will affect its safe and stable operation. To effectively suppress this DC voltage fluctuation, a DC voltage auxiliary control strategy using a variable-speed pumped storage unit is proposed. First, the simulation models of the variable-speed pumped storage unit, four terminal HVDC power grid, wind farm and photovoltaic power station are established. Secondly, the DC voltage deviation multiplied by the corresponding coefficient is used as the micro increment of the active power reference value of the variable-speed pumped storage unit. The influence of the steady-state component of the DC voltage on the DC voltage auxiliary control is filtered through the low-pass filter. An active power control strategy of the variable-speed pumped storage unit based on the DC voltage auxiliary control is proposed. Finally, taking the electric and power generation conditions of a variable-speed pumped storage unit as an example, the ability of the variable-speed pumped storage unit to suppress DC voltage fluctuation is simulated and compared with the traditional direct power control strategy. The simulation results show that the DC voltage fluctuation frequency caused by the output fluctuation of new energy is concentrated below 10 Hz, and the variable speed pumped storage unit control strategy proposed in this paper can effectively suppress the DC voltage fluctuation of an HVDC system.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. NY71-18-013).

Key words: variable-speed pumped storage unit; HVDC transmission system; auxiliary voltage control; renewable energy integration

0 引言

在中国未来的电力格局中, 可再生能源发电将成为重要的发电形式之一。而交流电网的灵活调节能力和适应性方面已经很难满足目前新能源大量并网的新形式。柔性直流输电系统可以实现有功功率和无功功率解耦控制、无需换相电压, 并可为弱系统、孤岛系统供电, 逐渐成为可再生能源外送的重要方式^[1-7]。由于风电、光伏等新能源输出功率波动较大, 严重影响了柔性直流输电系统的安全稳定运行, 交流励磁变速抽水蓄能机组转速可调, 能在毫秒级的时间里给予电力系统有功功率支撑。在具有风电、光伏等新能源的柔性直流输电系统中接入交流励磁变速抽水蓄能机组, 可以有效地抑制风电、光伏等新能源的出力波动, 保证柔性直流输电系统安全稳定运行, 并进行稳定的功率输出^[8-13]。因此, 在大规模新能源经柔性直流输电系统并网的大背景下, 研究如何发挥交流励磁变速抽水蓄能机组作用, 保障柔性直流输电系统安全稳定运行, 具有重要意义。

由于交流励磁变速抽水蓄能机组对系统频率支撑的重要性, 学者们在其系统建模和仿真分析上进行了一些研究^[14]。

文献[15]通过增加辅助频率控制环, 由储存在转子中的动能提供短时功率支撑, 在控制环的设计上, 实时检测系统的频率变化率 df/dt , 用于惯性响应的使能, 使得双馈机组拥有比同步电机更好的抵抗系统频率变化的阻尼效果, 但是频率变化率 df/dt 控制环节在系统频率恢复阶段会产生负阻尼效果, 影响频率的恢复。文献[16]介绍了双馈机组的下垂控制, 其设计原则是依据同步发电机调速器的一次调频过程, 将与系统频率(Δf)成比例的有功功率增量加入转子侧有功功率控制中, 但是该方法在频率跌落的初期作用很小, 不能发挥交流励磁变速抽水蓄能机组快速功率控制的优良性能。文献[17]提出了带 PD 环的虚拟惯性控制策略, 不仅可以消除频率单闭环控制时存在的稳态频差, 还可以实现对转速的快速跟踪, 有利于机组转速的快速恢复, 极大地增强了交流励磁变速抽水蓄能机组在交流电力系统中维护系统频率稳定的能力。

目前, 学者们对交流励磁变速抽水蓄能机组的研究主要集中在交流输电系统, 随着新能源经直流输电系统并网的发展^[18-23], 交流励磁变速抽水蓄能机组在直流输电系统中的应用成为研究热点。文献[24]通过合理配置抽水蓄能机组的组合模型实现了多元能源的协调优化及新能源的有效消纳, 但仅考虑常规机组的情况, 而未考虑抽水蓄能电站中变速

抽水蓄能机组的加入, 增加了抽水蓄能电站的调节性能。文献[25]以减少弃风为目标建立了风电与抽水蓄能协调优化的混合整数规划模型, 得到风电场弃风最小时抽水蓄能的最优运行出力。文献[26]提出了变速抽水蓄能机组平抑风电波动的协调控制策略, 该控制策略将直流系统功率缺额传递给变速抽水蓄能机组, 即为传统的直接功率控制策略, 但该控制策略功率补偿有一定滞后性, 不能有效抑制新能源出力波动引起的柔性直流输电系统直流电压波动。

基于此, 为了深入探究交流励磁变速抽水蓄能机组在柔性直流输电系统中的调节性能, 本文首先建立了基于交流励磁电机的变速抽水蓄能机组、四端柔性直流电网、风电场及光伏电站的仿真模型及控制策略。其次, 提出了在变速抽水蓄能机组的直接功率控制中加入调压辅助控制, 以直流电压偏差乘以相应的系数作为变速抽水蓄能机组有功功率参考值的微增量, 且通过低通滤波器滤去直流电压稳态分量对直流电压辅助控制的影响。最后, 对不同工况下变速抽水蓄能机组抑制柔性直流输电系统直流电压波动效果进行仿真和分析, 证明了本文所提控制方法的有效性及其鲁棒性。

1 柔性直流 MMC 数学模型及控制策略

1.1 MMC 数学模型

图 1 所示为单相的 MMC 简化电路^[27], 以此为例建立数学模型。

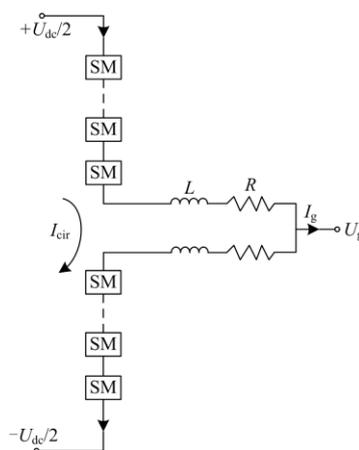


图 1 单相 MMC 模型

Fig. 1 Single phase MMC model

U_g 为换流器出口处的交流电压, U_{dc} 为换流器

的直流侧电压, U_u 和 U_p 分别为上、下桥臂电压,

I_u 、 I_p 、 I_g 和 I_c 分别为上桥臂电流、下桥臂电流、交流端口相电流和内部环流, L 和 R 分别为桥臂电感和桥臂等效电阻, 桥臂电阻可以模拟 MMC 每个桥臂内部的功率损耗。

上桥臂电流 I_u 、下桥臂电流 I_p 、交流端口相电流 I_g 和内部环流 I_{cir} 四者之间的关系可以表示为

$$I_g = I_p - I_u \quad (1)$$

$$I_{cir} = \frac{I_u + I_p}{2} \quad (2)$$

上桥臂电压 U_u 、下桥臂电压 U_p 、上下桥臂共模电压 U_{com} 和上下桥臂差模电压 U_{diff} 四者之间的关系可以表示为

$$U_{diff} = -\frac{1}{2}(U_p - U_u) = \frac{1}{2}(U_u - U_p) \quad (3)$$

$$U_{com} = \frac{1}{2}(U_u + U_p) \quad (4)$$

根据基尔霍夫电压定律(KVL), 可列出电路方程为

$$\frac{1}{2}U_{dc} - U_u - L_{arm} \frac{dI_u}{dt} - R_{arm} I_u = U_g \quad (5)$$

$$-\frac{1}{2}U_{dc} + U_p + L_{arm} \frac{dI_p}{dt} + R_{arm} I_p = U_g \quad (6)$$

将式(5)和式(6)分别相加和相减, 可以得到模块化多电平换流器直流侧和交流侧的数学模型为

$$\frac{R_{arm}}{2} I_g + \frac{L_{arm}}{2} \frac{dI_g}{dt} = U_g - \frac{U_p - U_u}{2} \quad (7)$$

$$\frac{U_{dc}}{2} - \frac{U_u + U_p}{2} = R_{arm} I_{cir} + L_{arm} \frac{dI_{cir}}{dt} \quad (8)$$

由电容充放电功率表达式可得

$$\frac{CU_{dc}}{S_{VSC}} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_i - P_o \quad (9)$$

式中: S_{VSC} 为换流站容量; P_i 和 P_o 分别为标幺化的直流输电系统输入和输出功率。若四端柔性直流输电系统中新能源出力波动时, 即 P_i 变化, 若此时负荷吸收有功功率不变, 即 P_o 不变, 则对应 U_{dc} 发生变化。因此, 当四段柔性直流输电系统中新能源出力增加时, 即 P_i 增加, 进而会导致四段柔性直流输电系统直流电压增加, 反之亦然。

1.2 MMC 控制策略

在 $d-q$ 坐标系下, MMC 的控制策略主要分为内环控制和外环控制, 如图 2 所示。外环控制采用无功功率控制和定直流电压或定有功功率控制, 内环控制采用电流控制, 其目的是为了快速跟踪其参考值。以 V_{abc} (交流电源电压)、 I_{abc} (交流电源电流) 和 U_{dc} (整流输出直流电压) 为输入, 通过 PLL 锁相环和 PI 控制器, 输出每个桥臂的触发脉冲, 实现各换流站的有功功率及无功功率解耦控制。

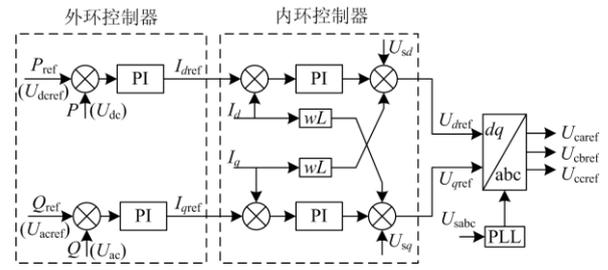


图 2 换流站级控制框图

Fig. 2 Converter station level control block diagram

2 变速抽水蓄能机组数学模型及控制策略

变速抽水蓄能机组的主要组成部分有: 可逆水泵水轮机、交流励磁发电电动机、有压过水系统和调速器。图 3 为可变速抽水蓄能机组系统结构图。

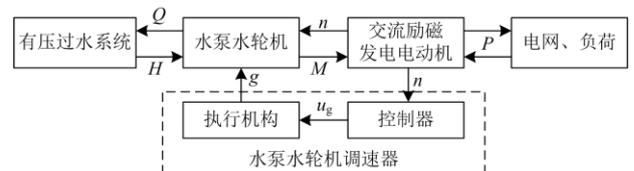


图 3 可变速抽水蓄能系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of variable speed pumped storage system

图 3 中: Q 为流量; H 为水头; n 为交流励磁发电电动机转速; M 为水泵水轮机输出机械转矩; P 表示电网与交流励磁发电电动机之间传递功率; g 为导叶开度。

2.1 交流励磁电机数学模型

为便于分析, 将交流励磁电机在三相静止坐标系下的数学模型转换到两相静止坐标系, 进而转换到 dq 旋转坐标系, 可得其电压方程为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (10)$$

式中: u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_{rd} 、 u_{rq} 分别为定、转子电压 d 、 q 轴分量; i_{sd} 、 i_{sq} 、 i_{rd} 、 i_{rq} 分别为定、转子电流 d 、 q 轴分量; ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 、 ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 分别为定、转子磁链 d 、 q 轴分量; ω_r 为转子角频率; ω_1 为同步角频率; R_s 、 R_r 分别为定、转子绕线电阻; $p=d/dt$ 为微分算子。

2.2 可逆水泵水轮机数学模型

1) 水轮机运行工况

当可逆水泵水轮机运行在水轮机工况时, 可等效为常规水轮机, 其模型方程可表示为

$$H = \left(\frac{Q}{g} \right)^2 \quad (11)$$

$$\dot{Q} = \frac{1}{T_w} \left(1 - \frac{Q^2}{A_t^2 g^2} \right) \quad (12)$$

$$\dot{g} = -K_a g + K_a v_{sm} \quad (13)$$

$$P_t = \gamma \eta_t H Q = 9.81 \eta_t H Q \quad (14)$$

式中: H 、 Q 和 g 分别为水轮机的有效水头、流量和导叶开度; T_w 、 A_t 分别为水流惯性时间常数和导叶系数; K_a 、 v_{sm} 分别为伺服电机的时间常数和输入电压; P_t 为水轮机功率; η_t 为水轮机效率; γ 为水的比重。

2) 水泵运行工况

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二次曲线^[10]。

$$H = a_0 n_r^2 + a_1 n_r Q + a_2 Q^2 \quad (15)$$

式中: a_0 、 a_1 、 a_2 为曲线拟合系数; n_r 为水泵转速。

由于水泵工况运行时节流效应的影响, 使得水流泵升过程存在一定扬程损失, 于是, 泵升过程所需总扬程 $H_{需}$ 包含静扬程 H_s 和损失扬程 H_l 两部分。此外, 由于损失扬程 H_l 与流量 Q 之间关系近似为一条抛物线, 因此, 水泵模式运行时所需总扬程为

$$H_{需} = H_s + H_l = H_s + f_e Q^2 \quad (16)$$

式中, f_e 为水泵摩擦系数。

此外, 水泵模式下机械功率 P_m 可表示为

$$P_m = \gamma \eta_p H Q = 9.81 \eta_p H Q \quad (17)$$

式中, η_p 为水泵效率。

交流励磁变速抽水蓄能机组的整体控制框图如图 4 所示。

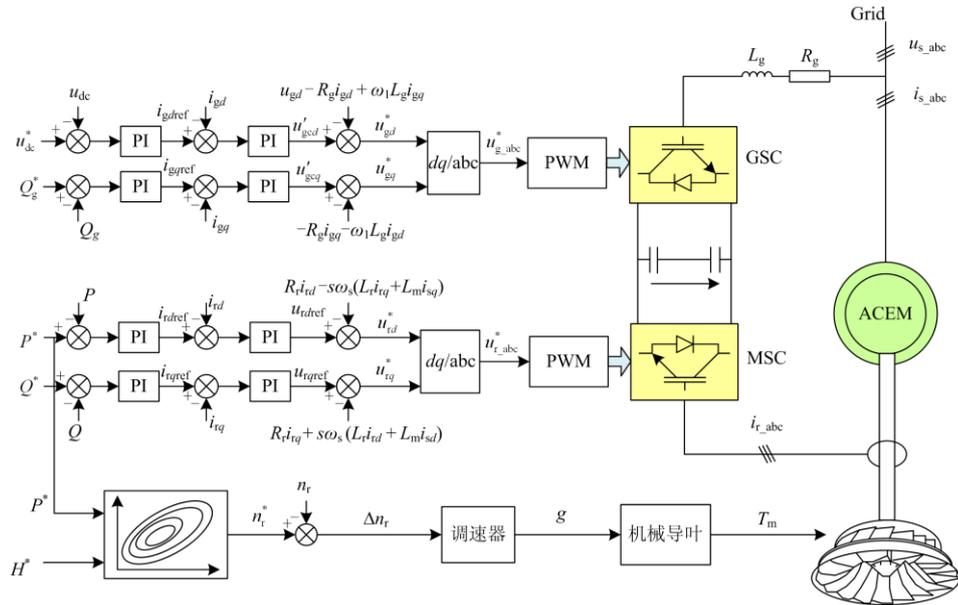


图 4 交流励磁变速抽水机组系统控制结构图

Fig. 4 Block diagram of AC excitation variable speed pumped storage unit control system

图 4 中，ACEM(AC Excited Machine)为交流励磁电机；GSC 为网侧变流器；MSC 为机侧变流器； u_{dc}^* 为变流器直流侧电压参考值； Q_g^* 为网侧变流器吸收无功功率参考值； P^* 为 ACEM 输出有功功率参考值； Q^* 为 ACEM 输出无功功率参考值； H^* 为实时水头； n_r^* 为机组转速参考值； n_r 为机组转速实际值； g 为导叶开度； T_m 为水泵水轮机输出机械转矩。其中：网侧变流器实现对机组直流母线电压的控制；机侧变流器实现对机组有功功率和无功功率的控制；水泵水轮机侧通过调速器和机械导叶实现对机组转速的调节。

2.3 抑制直流电压波动控制策略

新能源电站输出有功功率发生波动时，为了有效抑制与四端柔性直流输电系统相连负荷所吸收的有功功率发生波动，同时维持直流电压稳定，提出了适用于变速抽水蓄能电站的抑制四端柔性直流输电系统直流电压波动控制策略。

利用四端柔性直流输电系统的实时直流电压与直流电压参考值的差值乘以相应系数作为抽水蓄能机组有功功率参考值的微增量，该直流电网的直流电压差值经过低通滤波器，滤去 50 Hz 稳态波动分量，与常数 K_{pf} 相乘变为抽水蓄能机组有功功率参考值的微增量。其中 P_{ref} 的取值与新能源电站输出有功功率互补，当去掉 ΔP_f 时，即为传统的直接功率控制。控制框图如图 5 所示。

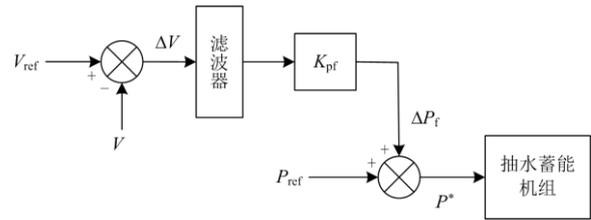


图 5 直流电压辅助控制框图

Fig. 5 DC voltage auxiliary control block diagram

图 5 中， V_{ref} 为四端柔性直流输电系统直流电压参考值； V 为负荷侧变流器出口处直流电压实际值； P^* 为图 4 中 ACEM 输出有功功率参考值。

为了确定滤波器的截止频率，在 Matlab/Simulink 中建立了四端柔性直流输电系统仿真模型，该四端柔性直流输电系统由负荷、变速抽水蓄能电站、新能源电站 A、新能源电站 B 及四端 MMC 换流站组成。

变速抽水蓄能电站容量为 1 500 MW，采用单机等值模型。四端柔性直流输电系统仿真模型中负荷端用无穷大电网代替。新能源电站 A 和新能源电站 B 仿真模型分别由永磁风电机组^[28-31]、双馈风电机组及光伏机组^[32-36]组成，总容量分别为 3 000 MW 和 1 500 MW。

四端 MMC 换流站电压容量分别为：抽蓄端 1 500 MW，负荷端 6 000 MW，新能源电站 A 端 1 500 MW，新能源电站 B 端 3 000 MW。且负荷端换流站采用定直流电压及定无功功率控制，抽蓄端、新能源电站 A 端、新能源电站 B 端换流站采用定有

功率及定无功功率控制。柔性直流输电系统直流电压为±500 kV。

四端柔性直流输电系统结构拓扑如图 6 所示。

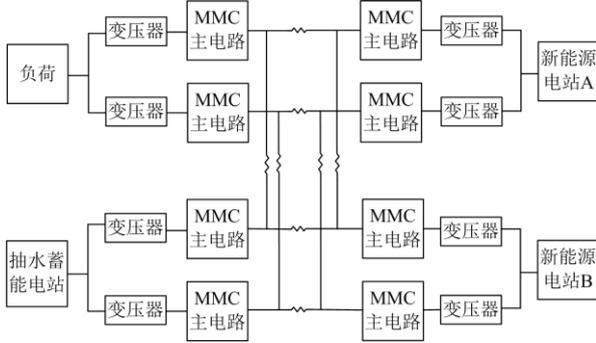


图 6 四端柔直电网系统结构拓扑

Fig. 6 Structure topology of four-terminal flexible HVDC system

新能源电站输出有功功率不变时，对四端柔性直流输电系统直流电压进行频谱分析，如图 7 所示。

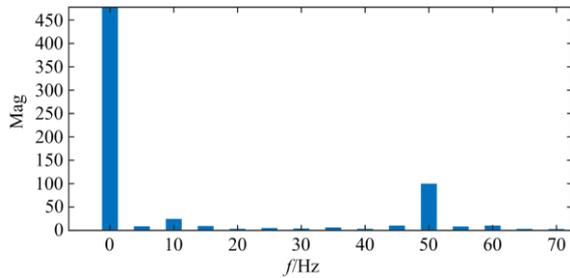


图 7 新能源电站出力不变时直流电压波动频谱分析

Fig. 7 Analysis of DC voltage fluctuation spectrum when the output of new energy power station is constant

新能源电站输出有功功率变化时，对四端柔性直流输电系统直流电压进行频谱分析，如图 8 所示。

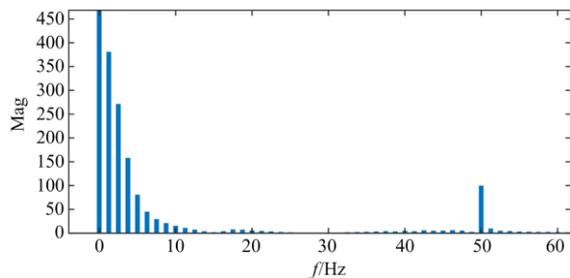


图 8 新能源电站出力变化时直流电压波动频谱分析

Fig. 8 Spectrum analysis of DC voltage fluctuation when output of new energy power station changes

从图 7 和图 8 中可以看出，新能源电站输出有功功率不变时，四端柔性直流输电系统直流电压频率波动主要集中在 50 Hz，由新能源电站输出有功

功率变化引起的四端柔性直流输电系统直流电压波动频率主要集中在 10 Hz 以下，为了使四端柔性直流输电系统直流电压的稳态 50 Hz 波动不引起有功微增量 ΔP_{ref} 的变化，采用低通滤波器，将滤波器的截止频率选在 30 Hz。

图 4 中的调频辅助功率 ΔP_f 可以表示为

$$\Delta P_f = K_{pv} \Delta V \quad (18)$$

式中， K_{pv} 为下垂增益。

3 柔性直流输电系统直流电压抑制能力分析

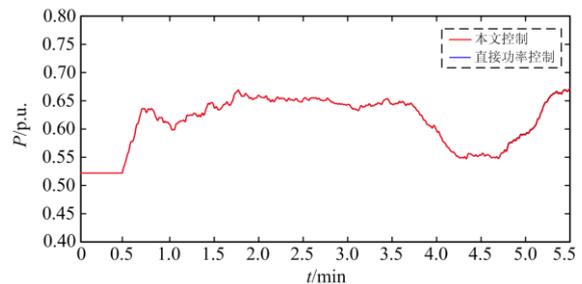
为了验证本文所提出的可变速抽水蓄能机组控制策略能更有效地维护四端柔性直流输电系统直流电压稳定，减少负荷端吸收有功功率的波动，在 Matlab/Simulink 中建立了四端柔性直流输电系统仿真模型，开展了源网荷储协调控制运行仿真分析。在新能源电站 B 输出有功功率发生波动场景下，对比变速抽水蓄能电站采用本文提出控制策略和传统直接功率控制策略对四端柔性直流输电系统直流电压波动的抑制作用，具体如下。

3.1 抽蓄机组发电工况下新能源有功变化场景

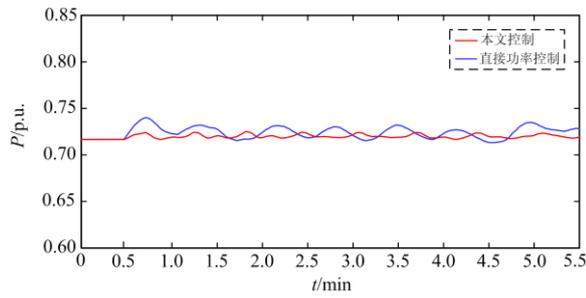
变速抽水蓄能电站处于发电工况下，新能源电站 A 输出有功功率保持 0.8 p.u. 不变，新能源电站 B 输出有功功率如图 9(a) 所示，变速抽水蓄能电站分别采用本文提出控制策略和传统直接功率控制策略。仿真波形如图 9 所示。

由图 9(b)、图 9(d) 可看出相比于传统直接功率控制，变速抽水蓄能机组在发电工况下采用本文提出的控制策略能更加有效地抑制四端柔性直流输电系统的直流电压波动，同时，减少负荷端吸收有功功率波动，更有利于维持四端柔性直流输电系统的稳定运行。

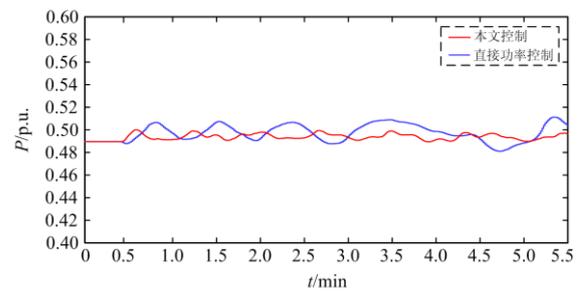
从图 9(d) 所示，采用本文所提出控制策略时，变速抽水蓄能机组的功率波动较大且波动速度较快，因此本文所提出控制策略不适用于常规抽水蓄能机组。



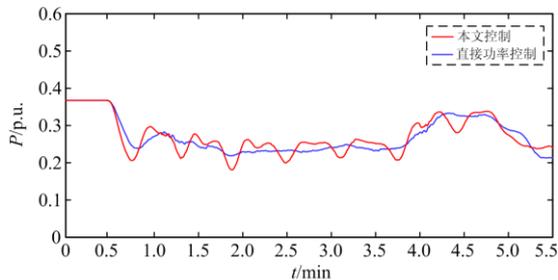
(a) 新能源电站 B 输出有功功率



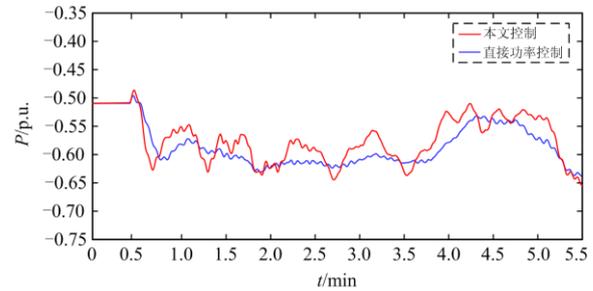
(b) 负荷端吸收有功功率



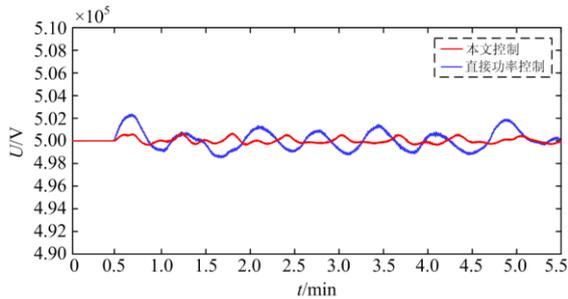
(b) 负荷端吸收有功功率



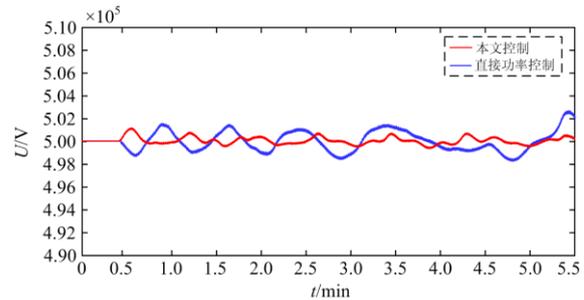
(c) 变速抽水蓄能电站输出有功功率



(c) 变速抽水蓄能电站吸收有功功率



(d) 四端柔性直流输电系统直流电压



(d) 四端柔性直流输电系统直流电压

图9 四端柔性直流输电系统仿真波形

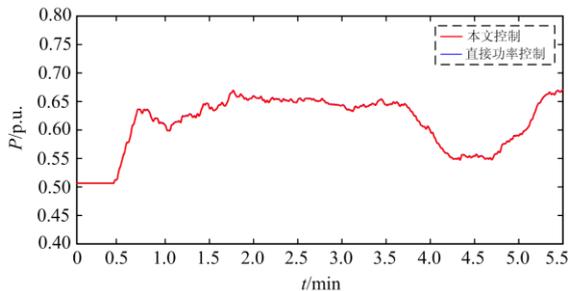
Fig. 9 Simulation waveform of four-terminal flexible HVDC system

图10 四端柔性直流输电系统仿真波形

Fig. 10 Simulation waveform of four-terminal flexible HVDC system

3.2 抽水机组电动工况下新能源有功变化场景

变速抽水蓄能电站处于抽水工况下, 新能源电站 A 输出有功功率保持 0.8 p.u. 不变, 新能源电站 B 输出有功功率如图 10(a) 所示, 变速抽水蓄能电站分别采用本文提出的控制策略和传统直接功率控制策略。仿真波形如图 10 所示。



(a) 新能源电站B输出有功功率

由图10(b)和图10(d)可看出, 相比于传统直接功率控制, 变速抽水蓄能机组在抽水工况下采用本文提出的控制策略能更加有效地抑制四端柔性直流输电系统的直流电压波动, 同时, 减少负荷端吸收有功功率波动, 更有利于维持四端柔性直流输电系统的稳定运行。

4 结论

本文在分析 ± 500 kV 四端柔性直流输电系统、变速抽水蓄能机组仿真模型及控制策略的基础上, 在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建了包括负荷、变速抽水蓄能电站、新能源基地 A、新能源基地 B 及四端 MMC 换流站组成的四端柔性直流输电系统仿真模型。在新能源基地输出有功功率发生变化的场景下, 分别对变速抽水蓄能机组采用本文提出控制

策略及传统直接功率控制策略参与四端柔性直流输电系统直流电压抑制效果进行仿真分析。得出如下结论:

1) 通过对比稳态和新能源出力波动时,四端柔性直流输电系统直流电压的频谱分析可知,直流电压的稳态波动频率主要集中于 50 Hz,而新能源出力波动引起直流电压的波动频率主要集中在 10 Hz 以下。

2) 变速抽水蓄能机组采用传统的直接功率控制时,功率补偿有一定滞后性,不能有效抑制新能源出力波动引起的柔性直流输电系统直流电压波动。

3) 变速抽水蓄能机组采用本文所提出控制策略时,由于增加直流电压辅助控制策略可以根据直流电压的波动调节机组的有功参考值,因此相比于传统的直接功率控制策略能更加有效地抑制新能源出力波动引起的柔性直流输电系统直流电压波动。

虽然本文对变速抽水蓄能机组参与直流电压调节控制策略进行了仿真研究,但是对于不同直流电压采集点、机组电容容量和可靠性以及通信网络故障或延时严重等情况对控制效果的影响,还有待后续进一步研究。

参考文献

[1] 孙凯祺,李可军,刘智杰,等.基于柔性直流互联的抽水蓄能与可再生能源协同运行策略[J].电力系统自动化,2019,43(8):41-46,92.
SUN Kaiqi, LI Kejun, LIU Zhijie, et al. Coordinated operation strategy for pumped storage and renewable energy generation based on VSC-DC integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 41-46, 92.

[2] 李欣悦,李凤婷,尹纯亚,等.直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.

[3] 张伟晨,熊永新,李程昊,等.基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J].电力系统保护与控制,2020,48(13):63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.

[4] 陈磊,何慧雯,王磊,等.基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J].电力系统保护与

控制,2020,48(19):119-127.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.

[5] 肖超,韩伟,李琼林,等.柔性直流输电系统交流侧线路继电保护适应性研究[J].智慧电力,2020,48(4):1-8.
XIAO Chao, HAN Wei, LI Qionglin, et al. Adaptability of MMC-HVDC system on relay protection of AC transmission lines[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 1-8.

[6] 刘卫东,李奇南,王轩,等.大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J].中国电力,2020,53(7):55-71.
LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind Farms[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-71.

[7] 李盈含,高亮,陈蒙蒙.柔性直流配电系统控制策略及保护技术研究综述[J].电测与仪表,2020,57(9):8-16,39.
LI Yinghan, GAO Liang, CHEN Mengmeng. Review on control strategy and protection technology of flexible DC distribution system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(9): 8-16, 39.

[8] SUN Bingxin, TIAN Shuping, HE Jiang, et al. Review on pumped storage power station in high proportion renewable energy power system[C] // 2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS), December 4-6, 2020, Jinan, China.

[9] ZHAO Haoran, BIE Zhaohong, WANG Ke, et al. A combined operation mode of wind power, gas-fired power and pumped storage[C] // 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), October 21-24, 2019, Xi'an, China.

[10] HOZOURI M A, ABBASPOUR A, FIRUZABAD M F, et al. On the use of pumped storage for wind energy maximization in transmission constrained power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 30(2): 1017-1025.

[11] 刘耀,吴佳玮,肖晋宇,等.有源型柔性直流输电技术在全球能源互联网背景下的应用研究[J].全球能源互联网,2020,3(2):107-116.
LIU Yao, WU Jiawei, XIAO Jinyu, et al. Application of active MMC-HVDC in the background of global energy interconnection[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 107-116.

[12] 陈蒙蒙,高亮,李盈含.兼顾柔性直流配电系统经济

- 成本的优化下垂控制策略[J]. 电力建设, 2020, 41(3): 119-126.
- CHEN Mengmeng, GAO Liang, LI Yinghan. Dual-objective optimal droop control strategy for flexible DC distribution systems[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(3): 119-126.
- [13] 尚学军, 霍现旭, 郑晓冬, 等. 基于离散小波分析与 K-means 聚类算法的 MMC-HVDC 输电线路保护方案[J]. 电测与仪表, 2020, 57(24): 52-57.
- SHANG Xuejun, HUO Xianxu, ZHENG Xiaodong, et al. MMC-HVDC transmission line protection scheme based on discrete wavelet analysis and K-means clustering algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(24): 52-57.
- [14] 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, July 26-30, 2015, Denver, CO, USA: 1-5.
- [15] 曹张洁. 双馈感应风电机组参与系统一次调频的控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- CAO Zhangjie. Study on control strategy of DFIG wind turbine for the participation of system primary frequency regulation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [16] 李辉, 王坤, 刘海涛, 等. 交流励磁抽水蓄能机组变下垂系数调频控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 68-73, 88.
- LI Hui, WANG Kun, LIU Haitao, et al. Variable droop coefficient frequency control strategy of AC excited pumped storage unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 68-73, 88.
- [17] 李辉, 刘海涛, 宋二兵, 等. 双馈抽水蓄能机组参与电网调频的改进虚拟惯性控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 58-65.
- LI Hui, LIU Haitao, SONG Erbing, et al. Improved virtual inertia control strategy of doubly fed pumped storage unit for power network frequency modulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 58-65.
- [18] LI Yan, LIU Hongzhi, CHI Yongning, et al. Fault ride-through demand of large-scale islanded renewable energy connected to VSC-HVDC system and its key technologies[C] // 2020 4th International Conference on HVDC (HVDC), November 6-9, 2020, Xi'an, China: 1248-1252.
- [19] YANG Jie, HE Zhiyuan, KE Jinkun, et al. A new hybrid multilevel DC-AC converter with reduced energy storage requirement and power losses for HVDC applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2082-2096.
- [20] SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Pilot protection of hybrid MMC DC grid based on active detection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 4(1): 82-96.
- [21] 孙冰, 包丹, 张磊. 考虑惯性与阻尼特性的 MMC-HVDC 附加功率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 108-114.
- SUN Bing, BAO Dan, ZHANG Lei. Supplementary power control scheme for an MMC-HVDC station considering inertia and damping[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 108-114.
- [22] ZHANG Haibo, ZHANG Sen. A new strategy of HVDC operation for maximizing renewable energy accommodation[C] // 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 16-20, 2017, Chicago, United States: 1-6.
- [23] DONG H Y, SONG H, JIANG G, et al. Smart operation of HVDC systems for large penetration of wind energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 359-366.
- [24] 刘芳, 潘毅, 杨军峰, 等. 风电-火电-抽水蓄能联合优化机组组合模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 766-775.
- LIU Fang, PAN Yi, YANG Junfeng, et al. Unit commitment model for combined optimization of wind power-thermal power-pumped storage hydro[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 766-775.
- [25] 邹金, 赖旭, 汪宁渤. 以减少电网弃风为目标的风电与抽水蓄能协调运行[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2472-2477.
- ZOU Jin, LAI Xu, WANG Ningbo, et al. Mitigation of wind curtailment by coordinating with pumped storage[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2472-2477.
- [26] 李偲, 郗文康, 张德隆, 等. 柔性直流系统中变速抽水机组与风电的协调控制策略研究[J]. 天津理工大学学报, 2020, 36(4): 16-21, 32.
- LI Cai, XI Wenkang, ZHANG Delong, et al. Research on coordinated control strategy of variable speed pumping unit and wind power in flexible DC system[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2020, 36(4): 16-21, 32.
- [27] 张婕, 曾国辉, 赵晋斌, 等. 基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 92-99.
- ZHANG Jie, ZENG Guohui, ZHAO Jinbin, et al. Modular multilevel converter capacitor voltage balancing strategy based on improved bubble sorting[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 92-99.

- [28] 马磊, 刘国荣, 毛云坤, 等. 基于 VSG 的永磁直驱风电机组惯量支撑控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(12): 115-120.
MA Lei, LIU Guorong, MAO Yunkun, et al. Inertia support control strategy for permanent magnet direct-drive wind turbines based on VSG[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(12): 115-120.
- [29] 葛延峰, 孙颖, 韩子娇, 等. 永磁同步风电机组的主动支撑控制及其在弱电网下的适应性分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 62-69.
GE Yanfeng, SUN Ying, HAN Zijiao, et al. Active support control strategy of permanent magnet synchronous wind turbine and its adaptability analysis under weak grid[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 62-69.
- [30] 卢一菲, 陈冲, 梁立中. 基于电-氢混合储能的风氢耦合系统建模与控制[J]. 智慧电力, 2020, 48(3): 7-14.
LU Yifei, CHEN Chong, LIANG Lizhong. Modeling and control of wind-hydrogen coupling system based on electricity-hydrogen hybrid energy storage[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 7-14.
- [31] YE Lin, ZHANG Cihang, TANG Yong, et al. Hierarchical model predictive control strategy based on dynamic active power dispatch for wind power cluster integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4627-4629.
- [32] 杨永恒, 周克亮. 光伏电池建模及 MPPT 控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊 1): 229-234.
YANG Yongheng, ZHOU Keliang. Photovoltaic cell modeling and MPPT control strategies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 229-234.
- [33] 曹斌, 刘文焯, 原帅, 等. 基于低电压穿越试验的光伏发电系统建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 146-155.
CAO Bin, LIU Wenzhuo, YUAN Shuai, et al. Modeling of photovoltaic power system based on low voltage ride-through test[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 146-155.
- [34] 王明松. 风-光-蓄-火联合发电系统的两阶段优化调度策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(5): 75-82.
WANG Mingsong. Two-stage optimal dispatching strategy of the wind-solar-pumped storage-thermal combined system[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(5): 75-82.
- [35] 翟晶晶, 吴晓蓓, 傅质馨, 等. 考虑需求响应与光伏不确定性的综合能源系统鲁棒优化[J]. 中国电力, 2020, 53(8): 9-18.
ZHAI Jingjing, WU Xiaobei, FU Zhixin, et al. Robust optimization of integrated energy systems considering demand response and photovoltaic uncertainty[J]. Electric Power, 2020, 53(8): 9-18.
- [36] WANG Wei, LIU Liu, LIU Jizhen, et al. Energy management and optimization of vehicle-to-grid systems for wind power integration[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(1): 172-180.

收稿日期: 2021-04-26; 修回日期: 2021-08-09

作者简介:

陈磊(1984—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电气工程及其自动化; E-mail: 349821487@qq.com

庄俊(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为储能集成应用、储能装备研制; E-mail: zhuangjun@epri.sgcc.com.cn

李辉(1973—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为风力发电技术、新型电机及其系统分析。E-mail: cqulh@163.com

(编辑 周金梅)