

引用格式:李从善,甄子凯,和萍,等.风电与多端柔性直流输电系统自适应分频协调控制策略研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):65-73.

Citation: LI Congshan, ZHEN Zikai, HE Ping, et al. Research on adaptive frequency division coordinated control strategy for wind power and multi terminal flexible HVDC transmission system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 65-73.

# 风电与多端柔性直流输电系统自适应分频 协调控制策略研究

李从善<sup>1,2</sup>, 甄子凯<sup>1</sup>, 和萍<sup>1</sup>, 武小鹏<sup>1</sup>, 范嘉乐<sup>1</sup>, 张晓伟<sup>1</sup>

(1. 郑州轻工业大学电气信息工程学院, 河南 郑州 450000; 2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**针对风电接入多端柔性直流输电系统,为充分发挥风电参与系统调频能力,解决交直流并网故障引起的直流系统电压和交流电网频率波动问题,本文在现有下垂控制基础上提出了附加自适应分频控制策略。将直流电压偏差信号作为控制器输入信号,通过一阶低通滤波器将输入信号分为高频波动信号和低频波动信号,根据风电和直流输电系统各自调频能力的不同,将高频波动信号附加在风电机组转子侧换流器有功功率控制环,低频波动信号附加在直流有功功率控制外环,同时将电压源换流器(voltage source converter, VSC)实时功率裕度与直流电压变化量引入分频控制,实时调整低通滤波器的时间常数,动态调整功率输出,提高系统稳定性。在PSCAD/EMTDC中搭建仿真模型,仿真验证所提控制策略的有效性。

**关键词:**风力发电;下垂控制;自适应分频控制;高频波动;低频波动;协调控制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.006 中图分类号: TM712 文章编号: 1673-9140(2024)01-0065-09

## Research on adaptive frequency division coordinated control strategy for wind power and multi terminal flexible HVDC transmission system

LI Congshan<sup>1,2</sup>, ZHEN Zikai<sup>1</sup>, HE Ping<sup>1</sup>, WU Xiaopeng<sup>1</sup>, Fan Jiale<sup>1</sup>, ZHANG Xiaowei<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, China;

2. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In response to the integration of wind power into the multi terminal flexible DC transmission system, this paper proposes an additional adaptive frequency division control strategy on the basis of existing droop control, in order to fully utilize the wind power's participation in system frequency regulation ability and solve the voltage and frequency fluctuations caused by AC/DC grid connection faults in the DC system. The DC voltage deviation signal is taken as the input signal of the controller, and the input signal is divided into high-frequency fluctuation signal and low-frequency fluctuation signal through the first-order low-pass filter. According to the different frequency modulation capabilities of the wind power and DC transmission systems, the high-frequency fluctuation signal is added to the active power control loop of the converter at the rotor side of the wind turbine, and the low-frequency fluctuation signal is added to the external loop of the DC active power control. At the same time, voltage source converter (VSC) real-time power margin and DC voltage variation are introduced into frequency division control to adjust the time constant of the low-pass filter in real time and dynamically adjust the power output to improve system stability. A simulation model is built in PSCAD/EMTDC to verify the effectiveness of the proposed control strategy.

**Key words:** wind power generation; droop control; adaptive crossover control; high frequency fluctuation; low frequency fluctuation; coordinated control

收稿日期: 2022-12-13; 修回日期: 2023-09-20

基金项目: 河南省高等学校重点项目(23A470011); 智能电网四川省重点实验室 2022 年开放基金项目(2022-IEPGKLSF-KFYB01)

通信作者: 李从善(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统稳定分析与控制、高压直流输电等研究; E-mail: 543627767@qq.com

风电作为发展较成熟的可再生能源发电技术之一,凭借其清洁无污染、投资成本低、发展前景广阔等优点,近年来得到了迅猛发展<sup>[1]</sup>。伴随风电规模逐步扩大,解决其大规模顺利输送是首要问题。柔性直流输电(voltage source converter-high voltage direct current, VSC-HVDC)因其特有的“柔性”控制特性,在大规模新能源并网中发挥着重要作用<sup>[2-3]</sup>。由VSC-HVDC发展而来的多端柔性直流输电系统(voltage source converter based multi-terminal high voltage direct current, VSC-MTDC)控制方式灵活,在新能源消纳领域具有突出优势<sup>[4-6]</sup>。风电经直流并网,导致风电与系统频率解耦,风电无法直接响应系统频率变化<sup>[7-8]</sup>。常用于解决含风电场的交直流电网频率稳定控制方法主要包括:①在直流外环控制器上附加频率控制,使直流系统能够响应交流系统频率变化,当某一端交流系统发生扰动后,其他交流系统通过多端直流(multi-terminal high voltage direct current, MTDC)互联系统进行功率支援;②将储能控制通过换流器并联在风电场与主网之间的直流线路上,使风电机组与储能系统联合输出有功参与频率调整<sup>[9-13]</sup>。

针对由于MTDC系统的隔离作用,风电场难以感知系统主网频率变化,从而导致风电场的惯性响应与一次频率调节能力丢失这一问题,文献[14]提出了一种频率采样方法,使电力电子变换器对频率变化感知更敏感,改变风电变流器向系统注入的可用惯量,参与系统频率调整。文献[15]在VSC-MTDC系统中,将直流电压作为中间变量,通过MTDC异步互联系统改变直流电压对交流侧频率进行调整。文献[16-17]提出了一种站间通信策略,在MTDC输电网络中将 $P-f$ 下垂控制附加在 $P-U_{dc}$ 下垂控制中,即通过MTDC系统将干扰转移到其他交流系统,对其提供频率支撑。文献[18]提出了在直流电压偏差与电网频率变化之间建立线性关系,通过监测直流电压偏差来调节交流频率,实现风电场频率支援,所采用的控制方式对控制器参数要求较高,若参数设计不当,可能会导致系统发生振荡。然而,在MTDC中交流网络之间的频率支持方面,上述方法主要关注频率偏差,可归为一次频率调节,并未考虑机组惯性响应。文献[19-20]在双馈风力发电机(doubly fed induction generator, DFIG)的外环有功功率上附加功率信号来进行频率控制,将转子动能转换为电能,该控制

未考虑风电机组运行状态变化,若对频率调整过多可能会起到相反作用。文献[21-22]中采用直流电压和交流频率下垂( $V_{dc}-f$ )控制,将直流电压偏差信号转换为频率偏差信号,该控制方法主要用于网侧换流站的协调控制,且在不平衡功率分配时忽略了电压源换流器(voltage source converter, VSC)实时运行状态,无法保证系统参与频率调整的同时安全稳定运行。文献[23]中提出了自适应下垂控制策略,根据 $V-I-f$ 特性,建立了交流系统频率偏差与直流电压之间的关系,换流站中的可变电容根据电网频率偏差自适应地提供直流电压参考,并对各换流站进行功率分配。然而,该控制方案采用多回路级联控制结构,参数整定困难。文献[24]将分频控制应用于混合储能控制系统,提取出高频功率波动作为超级电容输出功率参考,低频功率波动分量作为超蓄电池输出功率的参考,实现了储能单元对于不平衡功率的合理分配,但是该控制并未考虑系统频率响应。文献[25]在文献[24]的基础上提出一种自主分频控制策略,该控制中的比例控制在系统稳态时存在静态误差,超级电容仍需提供电流维持系统功率平衡。

本文对交直流并网的频率协调控制展开研究,提出考虑换流站功率裕度与直流电压偏差的自适应分频控制策略。分析“电压—有功”下垂控制作用机理,设计动态调整滤波器的时间常数。所提控制策略能够实现风电与直流系统协同参与系统频率调整,并且降低直流功率调节过程中引起的直流电压偏差。最后,基于PSCAD/EMTDC仿真平台上建立含风电的三端柔性直流系统模型,对所提分频策略进行多种故障下的仿真实验验证。

## 1 风电与VSC-MTDC参与电网频率控制原理分析

本文VSC-MTDC采用易于控制的并联型接线方式,系统结构如图1所示。 $S_i(i=1,2,3)$ 为交流系统; $R_s$ 与 $L_s$ 分别为交流侧等效电阻和等效电感; $L_{Load}$ 为等效负荷; $P_s$ 为交流联络线功率。其中,VSC1与VSC2为整流站,VSC3为逆变站,功率以注入直流电网方向为正方向。

在含风电的VSC-MTDC整体控制系统中,本文将VSC1、VSC2设置为具有功率调节能力的换流站,采用电压—有功下垂控制,用于承担系统中的不平衡功率,VSC3采用定功率控制。

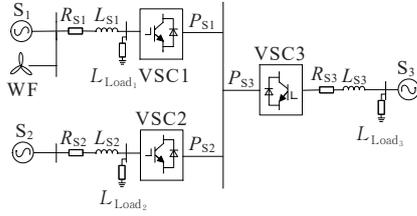


图1 并联放射形三端VSC-MTDC系统

Figure 1 Parallel radial 3 terminal VSC-MTDC system

### 1.1 VSC-MTDC 电容充放电控制和风电机组转子动能控制

直流电压动态表达式为

$$CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_{dc} - P_{ac} \quad (1)$$

式中,  $C$  为直流电容;  $U_{dc}$  为直流电压;  $P_{dc}$  为直流系统传输功率;  $P_{ac}$  为交流系统传输功率;  $t$  为时间。

直流线路电容放电阶段采用二阶微分方程表示为

$$\begin{cases} LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \\ i = -C \frac{du_c}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $L$ 、 $R$  为直流线路电感和电阻;  $u_c$  为电容器电压; 当转子转速为  $\omega_e$  时, 风力机中储存的转子动能为

$$E = \frac{1}{2} J \omega_e^2 \quad (3)$$

式中,  $E$  为转子动能;  $J$  为发电机转动惯量, 若电网频率发生变化, 转子转速由  $\omega_1$  变为  $\omega_2$ , 风力涡轮机中转子动能改变量为

$$\Delta E = \frac{1}{2} J (\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (4)$$

### 1.2 双馈风力发电机转子侧换流器控制

如图2所示的转子侧换流器控制框图, 将  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  作为中间变量, 经PI控制器积分环节输出, 其控制表达式为

$$\frac{dx_1}{dt} = \omega_{ref} + \omega_{href} - \omega_s \quad (5)$$

$$i_{qref} = k_{p1} (\omega_{ref} + \omega_{href} - \omega_s) + k_{i1} x_1 \quad (6)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = i_{qref} - i_{qr} = k_{p1} (\omega_{ref} + \omega_{href} - \omega_s) + k_{i1} x_1 - i_{qr} \quad (7)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = Q_{ref} - Q_s \quad (8)$$

$$i_{dref} = k_{p3} (Q_{ref} - Q_s) + k_{i3} x_3 \quad (9)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = i_{dref} - i_{dr} = k_{p3} (Q_{ref} - Q_s) + k_{i3} x_3 - i_{dr} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} v_{qr} &= k_{p2} (k_{p1} \Delta P + k_{i1} x_1 - i_{qr}) + \\ &k_{i2} x_2 + s_r \omega_s L_m i_{qs} + s_r \omega_s L_{rr} i_{dr} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} v_{dr} &= k_{p2} (k_{p3} \Delta Q + k_{i3} x_3 - i_{dr}) + \\ &k_{i2} x_4 - s_r \omega_s L_m i_{qs} - s_r \omega_s L_{rr} i_{dr} \end{aligned} \quad (12)$$

式(5)~(12)中,  $\omega_{ref}$ 、 $\omega_s$  分别为转子角频率整定值和实际运行值;  $\omega_{href}$  为附加变频控制有功功率支援转化为转子角频率指令值;  $i_{qref}$ 、 $i_{qr}$  分别为  $q$  轴电流整定值和实际值;  $i_{dref}$ 、 $i_{dr}$  分别为  $d$  轴电流整定值和实际值;  $Q_{ref}$ 、 $Q_s$  分别为无功控制参考值和实际值;  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$  分别为有功功率变化量和无功功率变化量;  $L_m$ 、 $L_{rr}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴的电感分量;  $k_{p1}$ 、 $k_{i1}$  分别为有功外环控制的比例系数和积分系数;  $k_{p2}$ 、 $k_{i2}$  分别为电流控制的比例系数和积分系数;  $k_{p3}$ 、 $k_{i3}$  分别为无功外环控制的比例系数和积分系数;  $v_{dr}$ 、 $v_{qr}$  分别为三相输出电压在双馈风机控制系统的  $dq$  坐标系下的  $d$ 、 $q$  分量;  $s_r$  为开关函数。根据DFIG变速恒频风电机组转子控制可知, 其转速范围较大, 采用转子惯量控制, 通过吸收或释放部分动能, 能够响应系统频率变化。

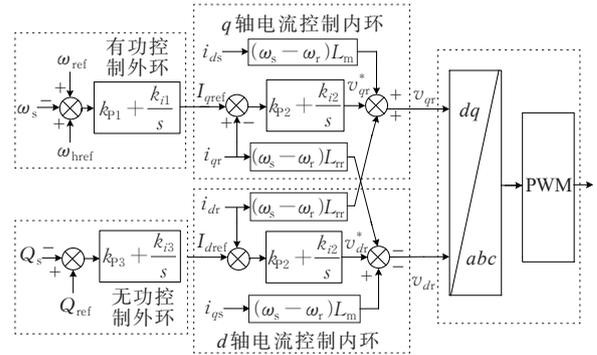


图2 RSC换流器控制框图

Figure 2 Control block diagram of RSC converter

### 1.3 “电压—有功”下垂控制

多端直流输电系统中的协调控制方法主要包括主从控制、下垂控制及功率裕度控制<sup>[26]</sup>, 直流电压下垂控制是一种多点直流协调控制策略。直流电压下垂控制结构如图3所示。

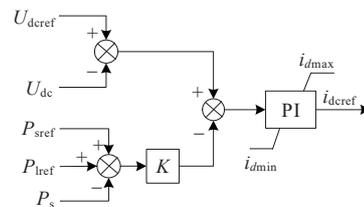


图3 直流电压下垂控制器

Figure 3 DC voltage sag controller

下垂系数  $K$  表达为

$$K = \frac{U_{dc} - U_{dcref}}{P_s - P_{sref}} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{U_{dc} - U_{dcref}}{U_{dcref}} = k \frac{f_s - f_{sref}}{f_{sref}} \\ U_{dc} - U_{dcref} = K(P_s - P_{sref} - P_{lref}) \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $P_s$ 、 $U_{dc}$ 分别为换流站有功功率与直流电压实测值;  $U_{dcref}$ 、 $P_{sref}$ 分别为换流站直流电压与有功功率的指令值;  $K$ 为换流站直流电压与有功功率的下垂系数,即  $P_s$ - $U_{dc}$ 的斜率,  $K$ 值决定了直流电压控制和有功功率控制在下垂控制中所占的比例,对于不同严重程度的有功波动,通过调节下垂系数  $K$  值来控制输送到直流电网的不平衡功率,当  $K$  值接近为 0 时,该控制将转化为定直流定压控制。

当交流系统发生扰动后,各换流站参与系统有功调节时,多端直流输电系统会出现以下几种情况:①系统扰动导致直流电压发生波动;②当系统下垂系数选取过大时,直流电压随有功功率的变化波动变大;③对于不同换流站,其下垂特性也会存在差异,导致直流电压偏差较大,难以保证控制器对电压与有功功率的精准跟踪。

假设在 VSC-MTDC 中有  $M$  个换流站采用电压—有功下垂控制方式,当直流系统出现不平衡功率  $\Delta P$  时,其表达式为

$$\Delta P = \sum_{i=1}^M \Delta P_i = \Delta U_{dc} \cdot \sum_{i=1}^M \frac{1}{K_i} = \Delta P_n K_n \cdot \sum_{i=1}^M \frac{1}{K_i} \quad (15)$$

第  $n$  个换流站中产生的有功波动为

$$\Delta P_n = \frac{\Delta U_{dc}}{K_n} \quad (16)$$

根据式(16)可知,各换流站承担不平衡功率大小由  $K$  值决定,  $K$  值过大或过小都会影响系统的稳定。在本文中  $K_1$ 、 $K_2$  均取 0.2。

此时,根据同步发电机的同步特性,各机组关系表达式为

$$f_s \uparrow \Rightarrow \delta \downarrow \Rightarrow P_{dc} \downarrow \Rightarrow U_{dc} \uparrow \Rightarrow \omega_g \uparrow \quad (17)$$

式中,  $\omega_g$  为发电机频率;  $\delta$  为功角;  $f_s$  为交流系统频率。

## 2 附加分频控制器设计

### 2.1 分频控制逻辑控制

图 4 为附加频率控制上层设计控制结构。当交流系统发生扰动后,附加控制器开始动作,为了保持频率稳定,受扰系统希望获得足够的有功支援,即通过增加直流电网对受扰交流系统进行有功支持。

假设与 VSC1 所连交流电网发生故障,换流站内故障产生的功率缺额为  $\Delta P_f$ ,风电场输送功率、系统频率与交直流线路输送功率的关系为

$$\Delta P_f = \begin{cases} P_{href}, & \Delta f \leq f_1 \\ P_{lref}, & f_1 < \Delta f \leq f_2 \\ P_{href} + P_{lref}, & \Delta f > f_2 \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $f_1$ 、 $f_2$  为频率触发信号;  $\Delta f$  为交流系统频率变化量;  $P_{href}$  为风电机组输送功率变化量;  $P_{lref}$  为直流系统中电容充放电所产生的功率变化量。

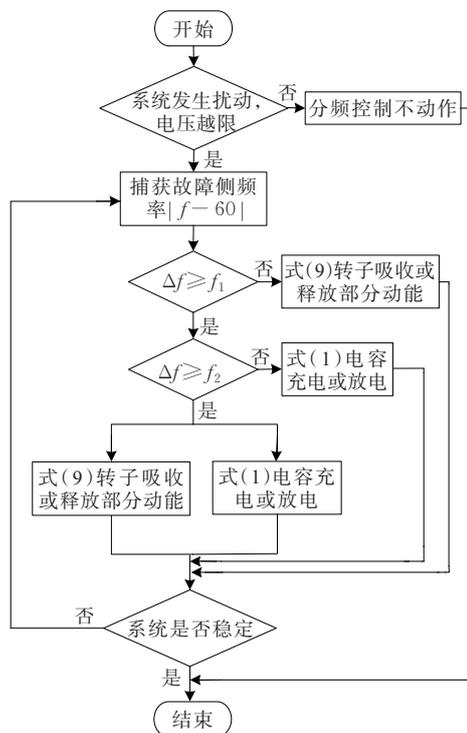


图 4 逻辑控制框图

Figure 4 Logical control block diagram

### 2.2 总体功率分配策略

分频控制系统由下垂控制模块、分频控制模块、风机转子控制模块组成。3 个部分共同动作,保证交流侧频率与直流侧电压稳定。

1) 下垂控制作为 VSC-MTDC 主要组成部分,用于维持 MTDC 系统的电压稳定与能量平衡。将分频控制流出的低频有功指令值附加在下垂控制模块上。

2) 在分频控制中,采用一阶低通滤波器,将直流电压作为全局变量,将当前换流站运行状态作为基准,根据换流站内实时可用裕度和允许电压变化量灵活地调节时间常数,从而实现对于电压波动的自主分频。将其输出电流作为内环的参考电流,通过一阶滤波环节将其分为低频信号与高频信号,计算出各自有功修正指令值。高频功率指令值附加到风机侧,即在转子侧附加功率控制,通过 DFIG 转子吸收或者释放部分动能,响应系统频率变化,使风电机组参与频率调整,然而转子动能有限,仅能

提供短期的频率支持。将低频功率指令值附加到下垂控制有功控制外环,  $P_s-U_{dc}$  下垂控制可以长时间地提供电能, 直流输电系统通过释放电容器的能量来提供额外的有功功率, 长时间提供频率响应。该控制充分利用风电机组调频的快速性与直流系统功率支援的持续性两方面优势, 协同响应频率变化, 维持频率稳定。

3) 分频控制器用于出现功率扰动时对系统的频率进行调节, 将交流系统受频率偏差引起的功率增量叠加在风电机组转子控制与下垂控制功率外环控制参考值上。

附加分频控制框图如图5所示,  $U^h$ 、 $U^l$  为电压分频控制动作上阈值与下阈值;  $\Delta U_{dc}$  为电压偏差值;  $I_{dc}$  为总电流;  $I_{href}$ 、 $I_{lref}$  分别为经一阶低通滤波器流出的电流高频信号与低频信号;  $P_{href}$  为风电机组输送功率变化量;  $P_{lref}$  为直流系统中电容充放电所产生的功率变化量。

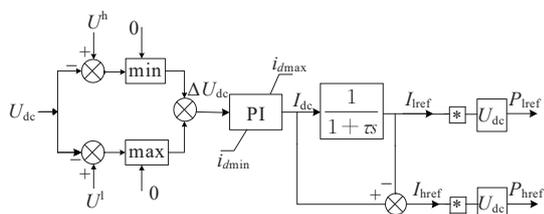


图5 附加分频控制器

Figure 5 Additional frequency division controller

为避免微小电压波动引起控制器频繁动作, 在该控制中设置上下阈值, 当直流电压波动越过阈值, 分频控制发挥作用, 参与系统频率调整。

假设附加分频控制环节增加的总有功功率指令值为  $\Delta P_f$ , 总电流为  $I_{dc}$ , 其表达式为

$$\Delta P_f = P_{href} + P_{lref} = I_{href} \cdot U_{dc} + I_{lref} \cdot U_{dc} \quad (19)$$

$$I_{dc} = (U_{dc}^{dref} - U_{dc}) \left( k_{p4} + \frac{k_{i4}}{s} \right) = I_{lref} + I_{href} \quad (20)$$

式中,  $k_{p4}$ 、 $k_{i4}$  为电压控制比例系数及积分系数。

本文采用的低通滤波器为一阶 RC 低频滤波器, 其微分方程表达式为

$$RC \frac{dU_{out}}{dt} + U_{out} = U_{in} \quad (21)$$

式中,  $U_{in}$  为低通滤波器输入信号;  $U_{out}$  为滤波器输出信号。

低通滤波器传递函数为

$$H(s) = \frac{1}{1 + s\tau} \quad (22)$$

式中,  $\tau$  为时间常数, 低通滤波器幅频特性如图6所示。

由图6可知, 低通滤波器的幅频函数是一个单调递减的函数, 其角频率为0时幅值取最大值1, 其角频率等于截止频率时, 其幅值为0.707。

滤波时间常数取值大小与系统整体控制效果、风电场输出功率、控制器响应速度及延迟等因素有关。当风电机组输出功率持续性波动剧烈时, 系统中低频功率波动占比较高, 滤波时间常数取较大值, 当系统中有功短时缓慢波动, 此时系统中频与高频功率波动占比较高, 滤波时间常数取较小值。滤波时间常数越大, 对于给定频率越小, 系统的整体平滑性越好。由于低通滤波器的相位延迟会影响到分频控制的响应时间, 因此, 在建模阶段考虑时滞环节很有必要。

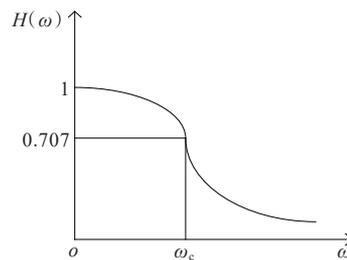


图6 低通滤波器的幅频特性

Figure 6 Amplitude-frequency characteristics of low pass filters

### 2.3 变时间常数控制

功率波动的大小决定了补偿系统有功指令值  $P_f$  的大小, 根据换流站实时功率裕度与电压偏差确定输入变量, 改变惯性环节的时间常数  $\tau$  来补偿较宽频带的输出波动成分。在可变时间常数自适应控制策略中, 定义换流站实时可用功率变化量绝对值  $|P_{avr}|$  为换流站的实时功率裕度, 其可用功率变化量  $P_{avr}$  表示为

$$P_{avr} = \begin{cases} P_{max} - P_s, & \Delta U_{dc} < 0 \\ -P_{max} - P_s, & \Delta U_{dc} > 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $P_{max}$  为换流站额定容量;  $P_s$  为有功功率实测值;  $\Delta U_{dc}$  为换流站直流电压变化值, 其表达式为

$$\Delta U_{dc} = U_{dc}^{dref} - U_{dc} \quad (24)$$

本文中允许的直流电压偏差量为  $\pm 10\%$  [27-28], 用  $U_{can}$  来表示, 其表达式为

$$U_{can} = \begin{cases} U_{dcmin} - U_{dc}, & \Delta U_{dc} < 0 \\ U_{dcmax} - U_{dc}, & \Delta U_{dc} > 0 \end{cases} \quad (25)$$

式中,  $U_{dcmax}$ 、 $U_{dcmin}$  分别为直流电压允许运行范围的上、下限。动态滤波时间常数控制框图如图7所示,  $D_1$  与  $D_2$  为比例系数。

动态滤波时间常数选择框图如图8所示。当 $\Delta U_{dc} > 0$ 时,采用时间常数 $\tau_1$ ,当 $\Delta U_{dc} < 0$ 时,采用时间常数 $\tau_2$ ,其表达式为

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (26)$$

图9中 $\tau_d$ 为控制周期; $\tau_t, \tau_{t+1}$ 分别为 $t$ 时刻与 $t+1$ 时刻的时间常数, $\tau_{\max}, \tau_{\min}$ 为滤波时间常数的上下限; $C_t$ 为滤波时间常数的变化率。 $C_t, \tau_d$ 的乘积为 $t+1$ 时刻的滤波时间常数修正量,即

$$\Delta\tau = C_t \cdot \tau_d \quad (27)$$

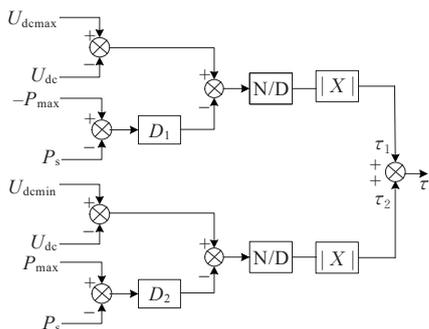


图7 动态滤波时间常数控制框图

Figure 7 Dynamic filtering time constant control block diagram

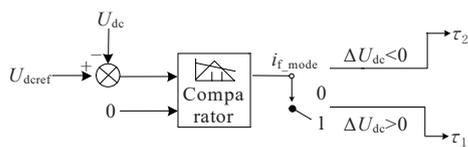


图8 时间常数选择框图

Figure 8 Time constant selection block diagram

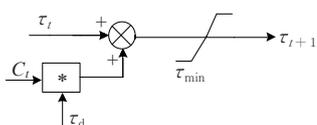


图9 时间常数修正图

Figure 9 Time constant correction diagram

采用自适应分频控制,当交流系统发生故障后,直流电压越限,附加分频控制器与逻辑控制器共同动作,直流电压下垂控制器通过频率反馈环节来感知系统中产生的不平衡功率,同时将VSC功率裕度与直流电压变化量引入分频控制,该控制在实现平抑功率波动过程中,不断实时地对低通滤波器的时间常数进行优化,实现了系统自主频率响应。风电机组通过转子控制改变机组输出有功调制信号,直流系统通过电容快速吸收或释放能量。附加分频控制与直流电压下垂控制之间进行协调优化,保证系统始终处于平衡状态,实现自主功率共享,提高系统频率稳定性。

### 3 仿真分析

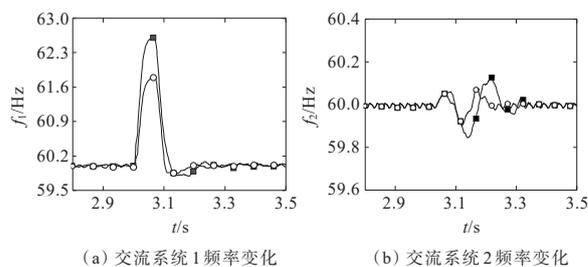
为验证本文所提分频协调控制策略的有效性,在PSCAD/EMTDC中搭建如图1所示含风电场的三端柔性直流输电系统仿真模型。通过3个故障情景对本文所提控制方法进行对比分析,其中, $f_i, P_i$ 分别为 $S_i$ 的频率和功率, $U_i (i=1, 2, 3)$ 表示各交流系统所连接的换流站直流电压。系统中主要仿真参数如表1所示。

表1 MTDC系统参数

Table 1 MTDC system parameters

参数	单位	数值
额定直流电压	kV	200
VSC1~VSC3额定功率	MW	40/35/-75
$S_1, S_2, S_3$ 机组装机容量	MW	480/360/360
风电机组装机容量	MW	100
直流电压允许波动范围		$\pm 10\%$
交流系统电压	kV	90
交流系统额定频率	Hz	60

1) 工况1:在3 s时,VSC1侧交流电网发生持续时间0.05 s的单相接地故障,接地电阻为0.05  $\Omega$ 。仿真结果如图10~12所示。

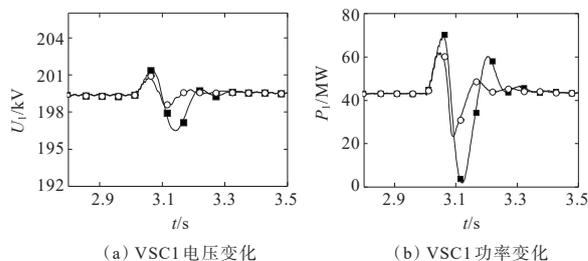


(a) 交流系统1频率变化 (b) 交流系统2频率变化

■ 常规控制策略 ○ 本文控制策略

图10 单相接地故障交流系统频率响应

Figure 10 Frequency response of AC system during single-phase fault



(a) VSC1电压变化 (b) VSC1功率变化

■ 常规控制策略 ○ 本文控制策略

图11 单相接地故障VSC1响应

Figure 11 VSC1 response during single-phase ground fault

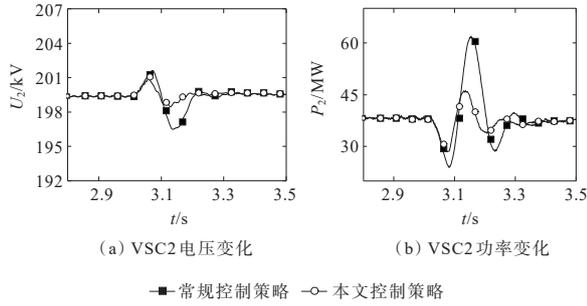


图 12 单相接地故障 VSC2 响应

Figure 12 VSC2 response during single-phase ground fault

由图 10~12 可知,采用传统下垂控制时,区域 1 交流系统由于接地故障引起系统频率升高。无附加频率控制时,系统仅依靠各发电机组调速器及负荷特性进行调节,导致频率最大偏差高达 +2.7 Hz,已远超出系统安全运行范围。在 3.05 s 后故障清除,VSC2 从交流网络迅速吸收能量,用于直流电容充电,将交流系统多余能量回馈到直流网络,3.2 s 之后缓慢恢复到额定状态;交流联络线功率  $P_s$  变化量为 39 MW,持续波动 0.3 s 后,恢复到稳定运行状态。采用本文的分频协调控制策略后,充分利用了风电机组和直流系统的快速调节能力。交流系统最大频率偏差为 +1.8 Hz,频率波动减小了 32%,在持续 0.2 s 后,系统频率恢复正常。换流站有功最大偏差为 +20、-16 MW,相比于传统下垂控制,有功波动减小了 38%,在 3.2 s 之后有功恢复至额定状态,使其恢复计划值运行。同时,直流电压波动减小了 35%,其恢复时间提高了 0.1 s。附加分频控制后,对区域 2 的交流系统进行有功支援的同时,交流系统频率始终保持在  $60 \pm 0.1$  Hz,处于安全运行范围之内,有功波动减小了 50%,电压波动减小了 30%,其故障恢复时间也得到了改善,在 3.2 s 时交流联络线恢复初值运行,从而验证了本文分频策略的良好调节效果。

2) 工况 2:在 4.0 s 时,VSC3 侧交流电网发生持续时间为 0.05 s 的 AC 相间短路,仿真结果的对比分析如图 13~15 所示。

故障发生后,由于 VSC3 向直流端注入大量的有功功率,直流电容充电,电压开始上升,此时依靠各发电机组调速器及负荷特性进行调节。在 4.05 s 后故障清除,VSC3 恢复直流电压调节能力,有功功率迅速回落,VSC1 从直流网络吸收能量迅速增加,用于直流电容充电,直至直流电压恢复到正常水平。在此期间有功波动最大达到 85 MW,最大频率偏差达到 1.55 Hz,电压波动达到 5.8 kV,在

4.35 s 之后交流联络线功率  $P_s$  恢复到额定值,持续波动 0.35 s 之后,交流系统恢复至初始状态。采用分频控制策略后,通过计算得到有功功率修正值,VSC3 侧交流电网频率波动减小了 0.3 Hz,VSC3 站内有功波动减小了 35%,电压波动减小了 32%,同时 VSC1 对 VSC3 有功支援的同时,有功波动与电压波动都得到了改善。整个交直流输电系统扰动恢复时间提高了 0.15 s,故障清除后,VSC-MTDC 恢复到故障之前的运行状态,平稳地过渡到稳定状态。

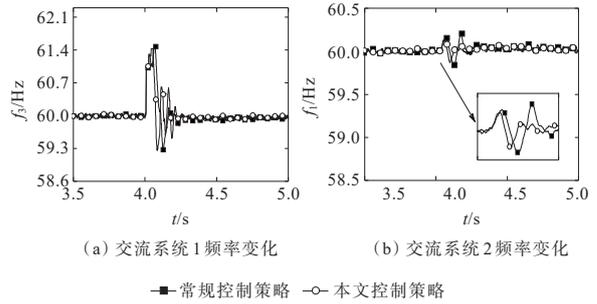


图 13 相间故障交流系统频率响应

Figure 13 Frequency response of AC system during phase to phase fault

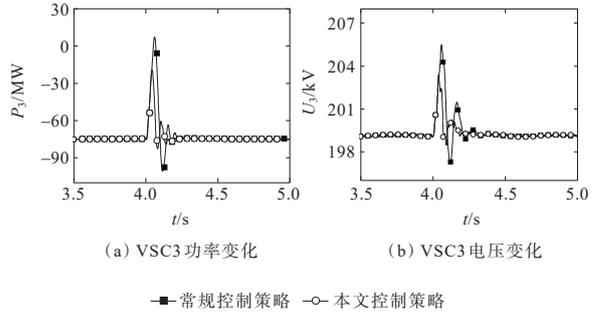


图 14 相间故障 VSC3 故障响应

Figure 14 VSC3 response during phase to phase fault

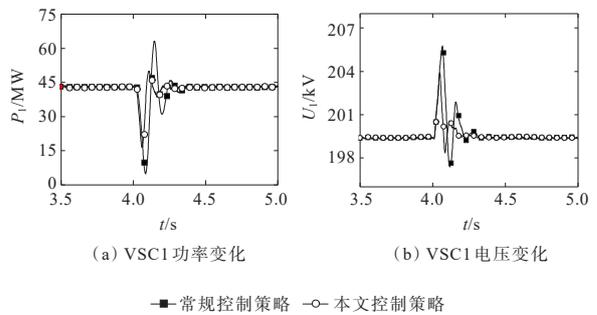


图 15 相间故障 VSC1 故障响应

Figure 15 VSC1 response during phase to phase fault

3) 工况 3:在 2.5 s 时,VSC1 侧交流系统发生三相接地故障,持续时间为 0.05 s,接地电阻为 0.05  $\Omega$ 。仿真对比分析如图 16~18 所示。

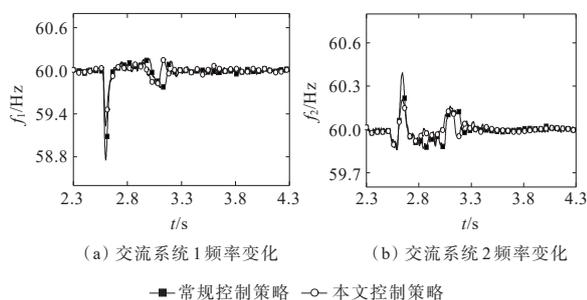


图 16 三相接地故障交流系统频率响应

Figure 16 Frequency response of AC system during three-phase grounding fault

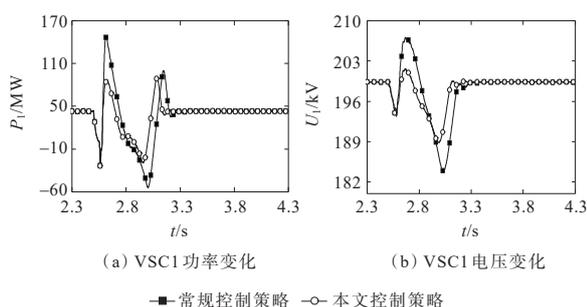


图 17 三相接地故障 VSC1 响应

Figure 17 VSC1 response during three-phase grounding fault

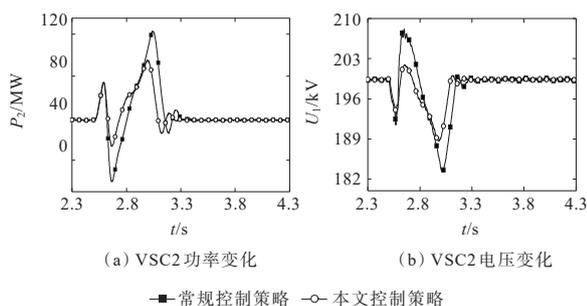


图 18 三相接地故障 VSC2 响应

Figure 18 VSC2 response during three-phase grounding fault

故障发生后, VSC1 的有功功率  $P_1$  快速下降, 伴随着频率发生剧烈波动, 电容放电导致直流电压急速下降, 故障期间, 直流电压维持在 193.5 kV, 此时 VSC2 对 VSC1 进行有功支援, 防止出现直流欠电压, 在 2.55 s 故障清除后, 换流站恢复电压调节能力, 有功功率快速增加, 从交流电网中吸收能量用于直流电容充电, 使其恢复至计划值运行。在此期间 AC1 频率波动变化量为  $-1.25$  Hz, 有功波动在 2.6 s 达到 155 MW, 电压波动最大达到  $-15$  kV, 在 3.3 s 之后交流联络线功率  $P_1$  恢复到额定值, 持续波动 0.8 s 之后, 交流系统恢复到稳定运行状态。附加分频控制之后, 故障端频率波动减小了 32%, 有功波动减小了 48%, 电压波动减小了 46%, 故障恢复时间缩短了 0.1 s, 在故障清除后, VSC-MTDC 恢复到故障之前的运行状态。

## 4 结语

对于风电经 VSC-MTDC 系统并网的“弱惯量”系统, 传统电压下垂控制策略难以在系统发生扰动时提供频率支撑, 导致系统频率偏差较大, 影响电网的安全稳定运行, 提出基于变时间常数的自适应分频控制策略, 利用低通滤波器将电压信号进行分频, 使 VSC-MTDC 与风电机组能够根据频率偏差协同参与频率调整。通过仿真验证了所提方法的有效性, 得出以下结论:

1) 所提分频控制策略能够克服传统下垂控制功率调节能力的不足, 减小系统扰动后的频率波动范围, 同时减小直流功率调节过程中引起的直流电压偏差;

2) 采用分频控制之后改善了系统整体惯量响应, 提高了系统频率跌落最低点。

## 参考文献:

- [1] 姜红丽, 刘羽茜, 冯一铭, 等. 碳达峰、碳中和背景下“十四五”时期发电技术趋势分析[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 54-64.  
JIANG Hongli, LIU Yuxi, FENG Yiming, et al. Analysis of power generation technology trend in the 14th Five-Year Plan under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 54-64.
- [2] 邹常跃, 韦嵘晖, 冯俊杰, 等. 柔性直流输电发展现状及应用前景[J]. 南方电网技术, 2022, 16(3): 1-7.  
ZOU Changyue, WEI Ronghui, FENG Junjie, et al. Development status and application prospect of VSC-HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(3): 1-7.
- [3] 杨万开, 王兴国, 王书扬. 渝鄂柔性直流输电接入电网高频谐振与抑制分析[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 492-500.  
YANG Wankai, WANG Xingguo, WANG Shuyang. Analysis of high frequency resonance and suppression in Yu to E VSC-HVDC project connected to power grid[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 492-500.
- [4] 张思彤, 梁纪峰, 马燕峰, 等. 直驱风电场经柔性直流输电并网的宽频振荡特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 33-42.  
ZHANG Sitong, LIANG Jifeng, MA Yanfeng, et al. Broadband oscillation characteristics analysis of a VSC-HVDC connected direct drive wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 33-42.
- [5] 饶宏, 周月宾, 李巍巍, 等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 1-11.  
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering

- application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2023,47(1):1-11.
- [6] 束洪春,邵宗学,赵伟,等.含柔性直流的交直流混联电力系统紧急频率控制研究[J].*电工技术学报*,2023,38(20):5590-5604.  
SHU Hongchun, SHAO Zongxue, ZHAO Wei, et al. Research on emergency power control of AC-DC hybrid power system with flexible DC[J].*Transactions of China Electrotechnical Society*,2023,38(20):5590-5604.
- [7] 李战龙,王祥君,王海云,等.基于直流风电机组的风电全直流输电系统综述[J].*电测与仪表*,2022,59(12):14-24.  
LI Zhanlong, WANG Xiangjun, WANG Haiyun, et al. Review of wind power ALL-DC transmission system based on DC wind turbine[J].*Electrical Measurement & Instrumentation*,2022,59(12):14-24.
- [8] 高凯,屈海涛,任茂鑫,等.基于可控电压源的高压直流输电换相失败抑制技术[J].*高压电器*,2023,59(1):49-57.  
GAO Kai, QU Haitao, REN Maixin, et al. Commutation failure suppression technology for HVDC transmission based on controlled voltage source[J].*High Voltage Apparatus*,2023,59(1):49-57.
- [9] 孙银锋,刘金鑫,梁栋.基于附加改进有源滤波器的柔性直流输电系统高频振荡抑制策略[J].*智慧电力*,2023,51(10):85-92.  
SUN Yinfeng, LIU Jinxin, LIANG Dong. High frequency oscillation suppression strategy for flexible HVDC system based on improved active filter[J].*Smart Power*, 2023,51(10):85-92.
- [10] 汤广福,贺之渊,滕乐天,等.电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J].*电网技术*,2008,32(22):39-44+89.  
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, TENG Letian, et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J].*Power System Technology*,2008,32(22):39-44+89.
- [11] 董朝武,李哲,蒲莹,等.一种应用于柔性直流输电控制保护系统的波特率动态自适应通信技术[J].*电力建设*, 2022,43(7):57-62.  
DONG Chaowu, LI Zhe, PU Ying, et al. A baud rate dynamic adaptive communication technology for flexible DC transmission control and protection system [J].*Electric Power Construction*,2022,43(7):57-62.
- [12] 杨张斌,李钢,王仙荣,等.应用于海上风电柔性直流输电系统的灵活调压策略[J].*供用电*,2022,39(9):76-82.  
YANG Zhangbin, LI Gang, WANG Xianrong, et al. Flexible voltage regulation strategy for offshore wind farm with VSC-HVDC[J].*Distribution & Utilization*, 2022,39(9):76-82.
- [13] 程林,章海静,夏楠,等.含大规模储能的多端直流输电系统协调控制策略[J].*电网与清洁能源*,2023,39(1):91-99.  
CHENG Lin, ZHANG Haijing, XIA Nan, et al. A study on the coordinated control strategy of the multi-end DC transmission system with large-scale energy storage[J].*Power System and Clean Energy*,2023,39(1):91-99.
- [14] 孙宏达,赵威,吴辰阳,等.柔性直流输电系统的附加频率控制[J].*云南电力技术*,2018,46(2):33-36.  
SUN Hongda, ZHAO Wei, WU Chenyang, et al. Additional frequency control of VSC-HVDC system[J].*Yunnan Electric Power*,2018,46(2):33-36.
- [15] ADEUYI O D, CHEAH-MANE M, LIANG J, et al. Fast frequency response from offshore multiterminal VSC - HVDC schemes[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2017,32(6):2442-2452.
- [16] PHULPIN Y. Communication-free inertia and frequency control for wind generators connected by an HVDC-link [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(2): 1136-1137.
- [17] CHAUDHURI N R, MAJUMDER R, CHAUDHURI B. System frequency support through multi-terminal DC (MTDC) grids[J].*IEEE Transactions on Power Systems*, 2013,28(1):347-356.
- [18] GEVORGIAN V, ZHANG Y C, ELA E. Investigating the impacts of wind generation participation in interconnection frequency response[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*,2015,6(3):1004-1012.
- [19] 刘彬彬,杨健维,廖凯,等.基于转子动能控制的双馈风电机组频率控制改进方案[J].*电力系统自动化*,2016,40(16):17-22.  
LIU Binbin, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Improved frequency control strategy for DFIG-based wind turbines based on rotor kinetic energy control[J].*Automation of Electric Power Systems*,2016,40(16):17-22.
- [20] DE RIJCKE S, TIELENS P, RAWN B, et al. Trading energy yield for frequency regulation: optimal control of kinetic energy in wind farms[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2015,30(5):2469-2478.
- [21] 朱瑞可,王渝红,李兴源,等.VSC-MTDC系统直流电压自适应斜率控制策略[J].*电力系统自动化*,2015,39(4):63-68.  
ZHU Ruike, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. An adaptive DC voltage droop control strategy for the VSC-MTDC system[J].*Automation of Electric Power Systems*, 2015,39(4):63-68.
- [22] MARTÍNEZ SANZ I, CHAUDHURI B, STRBAC G. Inertial response from offshore wind farms connected through DC grids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2015,30(3):1518-1527.
- [23] WANG W Y, LI Y, CAO Y J, et al. Adaptive droop control of VSC-MTDC system for frequency support and power sharing[J].*IEEE Transactions on Power Systems*,2018,33(2):1264-1274.

- [11] 李鹏,嵇佳丽,丁倩雯.基于熵值法特征筛选的GRNN降雹识别[J].气象,2021,47(7):854-861.  
LI Peng, JI Jiali, DING Qianwen. GRNN hail recognition based on entropy method and feature fusion [J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(7): 854-861.
- [12] 陆嘉铭,高洁.基于主成分分析法的线损指标评价[J].华东电力,2014,42(9):1817-1820.  
LU Jiaming, GAO Jie. Index evaluation of line loss based on principal component analysis[J]. East China Electric Power, 2014, 42(9): 1817-1820.
- [13] 张鼎衢,林国营,宋强,等.基于灰色理论及模糊层次分析法的电能计量装置状态评估[J].电测与仪表,2019,56(11):134-139+152.  
ZHANG Dingqu, LIN Guoying, SONG Qiang, et al. State assessment of electric energy metering device based on grey theory and fuzzy analytic hierarchy process[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(11): 134-139+152.
- [14] 程瑛颖,吴昊,杨华潇,等.电能计量装置状态模糊综合评估及检验策略研究[J].电测与仪表,2012,49(12):1-6.  
CHENG Yingying, WU Hao, YANG Huaxiao, et al. Fuzzy comprehensive status evaluation on electric energy metering device and test strategy research[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(12): 1-6.
- [15] 王保帅,尹家悦,胡珊珊,等.基于层次分析法和群体决策的智能电能表可靠性分配技术研究[J].电测与仪表,2021,58(12):169-174.  
WANG Baoshuai, YIN Jiayue, HU Shanshan, et al. Research on reliability allocation technology of smart meter based on analytic hierarchy process and group decision-making[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(12): 169-174.
- [16] 李发亮,刘国亮,张良,等.基于FC-AHP的电能计量系统改造项目评价模型[J].电子测量技术,2018,41(3):22-27.  
LI Faliang, LIU Guoliang, ZHANG Liang, et al. The evaluation model of energy measurement system reconstruction project based on FC-AHP[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(3): 22-27.
- [17] 何艺,秦丽娟.基于改进AHP和熵权法的计量自动化终端质量综合评价研究[J].电测与仪表,2015,52(23):58-62.  
HE Yi, QIN Lijuan. Research on comprehensive assessment of metering automation terminal quality based on the improved AHP and entropy method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(23): 58-62.
- [18] 吴争荣,俞小勇,董旭柱,等.基于状态估计的配电网实时态势感知与评估[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(3):140-145.  
WU Zhengrong, YU Xiaoyong, DONG Xuzhu, et al. Real-time situation awareness and evaluation of distribution network based on state estimation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(3): 140-145.
- [19] 贾春阳,李卫华,李小春,等.基于ICA的变化检测新方法[J].光电工程,2013,40(12):39-43.  
JIA Chunyang, LI Weihua, LI Xiaochun, et al. A novel change detection method using independent component analysis[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(12): 39-43.
- [20] ZHONG H, LIU J X, WANG L M, et al. Bearing fault diagnosis based on kernel independent component analysis and antlion optimization[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43(16): 3573-3587.

(上接第73页 Continued from page 73)

- [24] 文波,秦文萍,韩肖清,等.基于电压下垂法的直流微电网混合储能系统控制策略[J].电网技术,2015,39(4):892-898.  
WEN Bo, QIN Wenping, HAN Xiaoqing, et al. Control strategy of hybrid energy storage systems in DC microgrid based on voltage droop method[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 892-898.
- [25] GU Y J, LI W H, HE X N. Frequency-coordinating virtual impedance for autonomous power management of DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2328-2337.
- [26] 卢宇,姜崇学,汪楠楠,等.柔性直流电网站间协调控制功能及稳控配合研究[J].电气技术,2022,23(4):63-69.  
LU Yu, JIANG Chongxue, WANG Nannan, et al. Research on inter-station coordinated control and stability control cooperation in flexible DC grid[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(4): 63-69.
- [27] 刘英培,崔汉阳,梁海平,等.考虑直流电压稳定的VSC-MTDC附加频率自适应下垂控制策略[J].电网技术,2020,44(6):2160-2168.  
LIU Yingpei, CUI Hanyang, LIANG Haiping, et al. Additional frequency adaptive droop control strategy considering DC voltage stability for VSC-MTDC system [J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2160-2168.
- [28] 曾蕊,李保宏,江琴,等.级联型混合直流输电系统的自适应下垂控制策略研究[J].电力工程技术,2022,41(2):60-66.  
ZENG Rui, LI Baohong, JIANG Qin, et al. Adaptive droop control strategy of cascaded hybrid HVDC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 60-66.