

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2023.07.008

基于新能源发电的构网型协调储能控制策略研究

郑云平, 焦春雷, 亚夏尔·吐尔洪, 赵立斌

(国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 中国正加速构建以新能源为主体的新型电力系统,其在缺少同步机后,没有了阻尼和惯性支撑,会导致系统稳定性下降,因此构网型控制技术(GFM)应运而生。在此基础上基于新能源发电的构网型控制需要某种形式的能量存储与发电装置耦合。此时储能系统(ESS)可在变流器的直流侧或交流侧耦合接入。文中提出了一种基于新能源发电的构网型协调储能控制策略,该策略允许安装在变流器交流侧的ESS具有与安装在变流器直流侧获得的相同的特性和动态行为。此外,所提出的控制还可以协调储能保证系统在新能源不能正常发电时,即电压跌落期间的安全稳定运行,并提供稳定的电压支撑和功率补偿。最后利用Simlink仿真验证了构网型控制面对故障时良好的动态响应能力。

关键词: 储能系统; 构网型控制; 新能源发电

Research on Grid-forming Coordinated Energy Storage Control Strategy Based on Converter-interfaced Generation

ZHENG Yunping, JIAO Chunlei, YAXAR·Turgun, ZHAO Libin

(Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: China is accelerating the construction of a new type of power system with new energy as the main body. In case of the lack in synchronous machine, it will lose damping and inertial support, which will cause reduction of strength and stability of the system. Therefore, Grid-forming control technology(GFM)came into being. On this basis, the grid-forming control based on new energy generation requires some form of coupling between energy storage and generation settings. At this time, the energy storage system(ESS)can be coupled to the CIG on the DC side or AC side of the converter. In this paper, a grid-forming coordinated energy storage control strategy based on converter-interfaced generation is proposed, which allows ESS installed on AC side of converter to have the same characteristics and dynamic behaviors as those obtained on DC side of converter. In addition, the proposed control can coordinate the safe and stable operation of the energy storage system when the new energy cannot generate electricity normally, which is during the voltage drop provide stable voltage support and power compensation. Finally, Simlink simulation is used to verify the good dynamic response ability of grid-forming control in the face of failure.

Key words: energy storage system; grid-forming control; converter-interfaced generation

0 引言

为响应“双碳”目标的号召,中国正在加速建设以新能源和电力电子设备为主导的新型电力系统。随之构网型控制技术应运而生。以构网型变

流器作为新能源发电系统的底层逻辑操作,首先意味着存在能量存储。另外作为在平抑新能源发电功率波动,降低大电网调峰压力,提升大电网对新能源的接纳水平方面,储能环节是个必选项^[1-2]。其可用于解决瞬态期间的供需不平衡。因此为了在

收稿日期:2023-01-23; 修回日期:2023-03-09

基金项目:国网新疆电科院科技类项目(2022年新疆构网型储能涉网性能评估服务项目)。

Project Supported by Science and Technology Project of Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. (2022 Grid Energy Storage Support Technical Service Project for Network-related Performance Evaluation Service).

新能源高渗透下保持电力系统的稳定性,构网型储能应运而生^[3-4]。所谓构网型储能指在新能源附近增加具备同步发电机或者类似同步发电机的频率调节和电压控制能力的新型设备,构网型储能相较于传统储能不仅可以全面提升电力系统调节能力和灵活性,又可以在各种应用场景中提高储能系统收益^[5-6]。

另外,在新能源发电中,扰动期间所需的瞬态功率可以由直流电容提供。事实上,处于并网状态时的变流器对于直流电容的电压变化已被证明能够等效于同步发电机中的惯性响应^[7],并且在文[8]中首先提出了一种虚拟惯性控制,之后进行了改进,再利用这种直流电压动态模拟惯性^[9]。然而,采用这种方式,则需要一个大的直流电容器提供足够的惯性,从而使其更适合大型高压直流系统^[10]。在可再生能源发电与电力储能系统(ESS)相结合这一背景条件下,使用构网型控制作为解决方案无疑是最适合的。因为它在没有同步发电机的条件下可提供有效的电压支撑,并且所提供的支撑不会干扰最佳发电条件。在直流侧储能充足的假设下,以虚拟同步发电机(VSG)控制^[11]为基础的构网型控制技术已应用于各种不同的新能源发电系统中。相关的例子有光伏电站、屋顶光伏系统、风力涡轮机、风力发电场、汽车充电站、混合光伏柴油系统和直流微电网。这些可以与ESS集成^[12],并提供下垂频率控制和惯性响应^[13]。

在使用构网型控制的条件下,ESS可以被认为是一个滤波器,将过滤后的功率存储在ESS中。这项工作的重点是在交流侧ESS布置上实现构网型控制。此外,以往的工作大多集中在研究在受到较大扰动后直流侧储能形成新能源发电的电网的支撑作用上^[14]。然而,除了这种瞬态响应外,新能源发电还应缓解正常运行下可再生发电量的随机变化对频率的影响^[15]。这对于新型电力系统的建设尤其重要。频率变化过大可能导致保护系统不必要的跳闸,最终可能导致停电。然而,以往的工作都没有对这方面进行过研究,也没有任何工作表明如何将交流侧ESS储能系统和构网型控制相结合以减轻频率波动和功率变化的影响。文中将重点考虑此类的问题。

文中首先总结了构网型储能变流器的典型结构,回顾了基于VSG的构网型控制模式,随后提出了一种新的基于新能源发电的构网型协调储能控制策略,该方法将新能源发电系统与放置在交流侧的储能部分协调控制,且可适当地模拟同步机的惯性响应,并有效地抑制新能源发电的功率变化。随

后通过基于MATLAB/Simulink的仿真实验验证了所提出的控制方法的可行性,最终得出结论。

1 构网型储能变流器系统研究

1.1 构网型储能变流器控制系统

对于构网型变流器的概念还没有一个完善的表述,目前工业界和学术界正在讨论一个官方定义。尽管如此,已经提出了几种构网型控制结构。对于构网型变流器来说,其可以表示为具有低串联阻抗的电压源。简化显示了构网型变流器的等效结构见图1。基于此,可以看出构网型变流器是通过直接控制输出端的电压来调节功率。

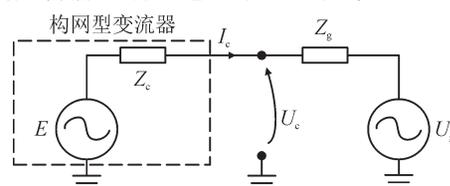


图1 构网型变流器的简化表示

Fig. 1 Simplified representation of grid-forming converter

此外,空载条件下的构网型变流器为负载和附近运行的其他单元提供参考电压,在稳态运行时,构网型变流器根据实际运行情况控制向电网注入有功功率和无功功率,同时遵循变流器内部物理电压和电流的限制。此外,构网型变流器可以通过附加的外部回路来实现连接点电压和频率的调节,修改实际有功和无功功率设定值。

构网型储能变流器的典型结构见图2。并网逆变器交流侧通过LC滤波后,经过公共耦合点(PCC)采集三相电压及三相电流,并经过功率计算、构网功率同步控制及坐标变换和PWM调制后形成驱动信号反馈注入到开关管中,形成闭环^[16]。与现存市面上的跟网型变流器控制相比,构网型变流器有两大创新区别点:首先在变换器侧添加了储能设备,其很大作用上满足了动态调节过程能量的吸收和释放^[17],实现了能量的双向流动,其二就是控制策略的区别,具体说就是功率外环的区别。通过功率外环即对有功和无功功率进行调节,获得电压幅值及相位同步信号,进而通过电压电流双闭环作用生成开关管所需的驱动信号。下面对于构网型变流器中的VSG控制策略以及储能单元进行深入剖析。

1.2 基于VSG的构网型控制

在文中所采用的构网型控制是以VSG控制为底层逻辑。VSG控制在以前的文献中已经有了广泛的描述,在这里进行一个简短的回顾,以便理解其运作模式。

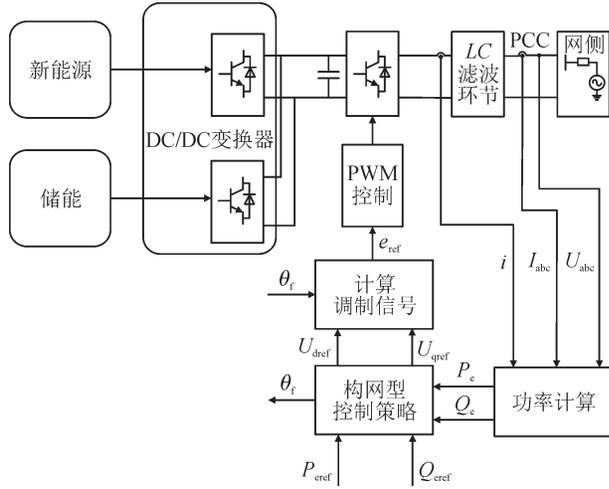


图2 构网型储能变流器的典型结构

Fig. 2 Typical structure of grid-forming energy storage converter

VSG控制的一大特色即是功率控制指令。在引入功率指令之前,可从宏观上概述下逆变器功率控制的本质。首先功率指令和反馈回来的输出功率做对比,然后调整PWM波。PWM波的本质是操纵逆变器半导体器件的通断以获得目标电压或者目标电流。调整PWM波则逆变器的输出电压相应改变。而逆变器输出电压改变又会改变输出功率,输出功率会反馈回去与功率指令做对比。这个循环会持续到逆变器输出功率满足要求。在电压型VSG控制环节中,频率和初相位都由转子机械方程得出,而幅值由虚拟励磁环节得到。

通常情况下,由有功功率调节部分确定参考电压相位,无功功率调节部分确定参考电压幅值。构网型VSG控制基本控制框图见图3,其虚拟阻抗也可以包含在结构中^[18]。

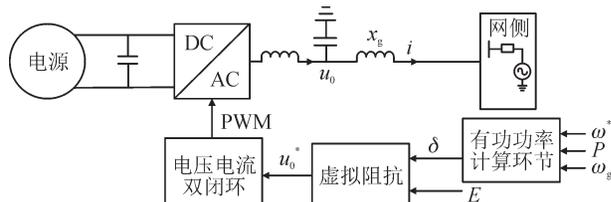


图3 构网型VSG控制基本控制框图

Fig. 3 Basic control block diagram of grid-forming VSG control

在有功功率调节中,通常采用方程(1)进行功率同步,而方程(2)建立了频率和下垂功率的关系,进而对系统的频率进行支撑。

$$\begin{cases} M \frac{d\Delta\omega_{VSG}}{dt} = P^* + P_{droop} + D\Delta\omega_{VSG} - P \\ \dot{\delta} = \Delta\omega_{VSG} \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{droop} = K_d(\omega^* - \omega_{pll}) \quad (2)$$

$$v_o^* = E\angle\delta - i(r_v + j\omega_{VSG}l_v) \quad (3)$$

式(1)-(3)中: M 为虚拟惯量系数; D 为阻尼因子; K_d 为下垂增益系数; ω^* 为频率参考值; ω_{pll} 为锁相环所测频率; ω_{VSG} 为变流器内频率。需要注意的是,这里的锁相环仅用于下垂控制而不参与同步。在暂态状态下,变流器频率 ω_{VSG} 相对于电网频率的变化是滞后的,因此会瞬时导致变流器电压与电网电压之间的相位差 δ 变大。在稳态下,变流器频率等于电网频率。参考功率 P^* 由新能源发电的前馈功率决定,如果没有新能源发电环节且系统仅连接ESS条件下,则将其设置为零^[19]。

对于模拟发电机的电势 E ,则采用无功功率调节法来确定。控制回路中的虚拟阻抗可视为与输电线路的阻抗串联,可用于修改 R/X 比,增加系统阻尼以帮助稳定或解耦电阻线路中的有功功率和无功功率^[20-21]。

另外,基于VSG控制的变流器输出的有功功率 P 由参考功率 P^* 、下垂功率 P_{droop} 和瞬态惯性功率控制组成,其中下垂功率和瞬态惯性功率由ESS提供。ESS储能部分可以放置在新能源发电系统的内部直流侧(文中称为基于新能源发电的直流侧储能系统)或外部交流侧(文中称为基于新能源发电的交流侧储能系统)。本节其余部分将介绍这两种配置的特点^[22]。

1.3 基于新能源发电的直流侧储能系统配置

基于新能源发电的直流侧储能系统结构框图见图4,在基于新能源发电的直流侧储能系统配置中,ESS储能部分被放置在网侧变流器的直流侧,实现构网型控制。发电侧变流器采用最大功率点跟踪(MPPT)控制,储能侧变流器用于控制直流电压。在这种拓扑结构中,网侧变流器中的构网型控制形成向电网 v_g 供电的电压 v_o 。参考功率 P^* 为机侧变流器的新能源发电前馈功率。因此,整个直流侧储能系统在发电和频率响应方面模拟了传统同步发电机的行为。这种配置可以通过与直流侧ESS的双向交换来为网侧变流器乃至电网提供足够的电源。

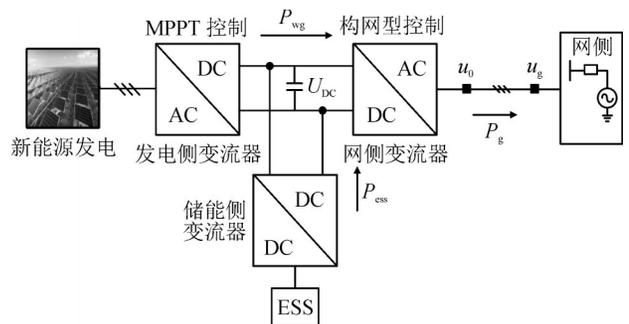


图4 基于新能源发电的直流侧储能系统结构框图

Fig. 4 Structure block diagram of DC side energy storage system based on new energy generation

1.4 基于新能源发电的交流侧储能系统配置

在现实实践中,大多数光伏及风电装置已经连接到电网,以电网馈电模式运行。对于现有直流储能系统,如图4所示,在直流侧加入ESS将需要增加网侧变流器的容量,以增大电能交换的能力,但与此同时也大大增加了成本。因此在此基础上,可将ESS系统直接放置在新能源发电系统的交流侧,即无需增加网侧变流器的容量,使储能侧ESS直接参与电能的交换。即为基于新能源发电的交流侧储能系统见图5,在这种拓扑结构中,原先的新能源发电系统不需要任何更改,并保持在当前模式下运行,将产生的电力输入电网^[23]。

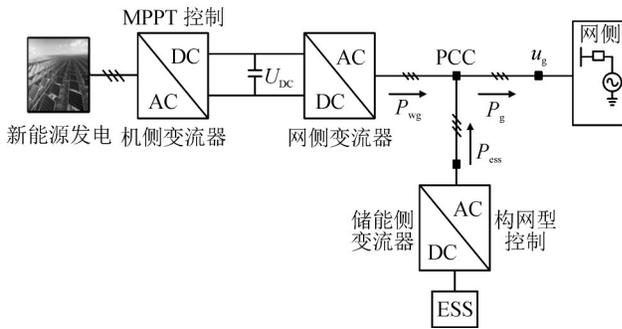


图5 基于新能源发电的交流侧储能系统结构框图

Fig. 5 Structural block diagram of AC side energy storage system based on new energy power generation

更改位置后,由于构网型控制仅应用于ESS,方程(1)中的测量功率 P 为 P_{ess} ,参考功率 P^* 设为零,只有下垂功率 P_{droop} 是输入量。而注入电网的功率是新能源发电功率和ESS补偿功率之和。

另外在交流侧储能系统中,储能侧变流器中的基于VSG的构网型控制框图见图6。首先有功一频率调制环节可通过下垂控制单元获得虚拟机械功率 P_m ,见式(4)。无功一电压调制环节则是对无功功率进行闭环控制进而调节输出出来保证系统的电压稳定,见式(5):

$$P_m = P_{ref} - k_p(\omega - \omega_s) \quad (4)$$

$$E = E_{ref} - k_q(Q - Q_{ref}) \quad (5)$$

式(4)、(5)中: ω 为实际角频率; ω_s 为系统角频率额定值; k_p 为有功一频率环节下垂系数; P_{ref} 为有功功率指令值; E 为内电势幅值; E_{ref} 为内电势指令值; k_q 为无功一电压下垂系数; Q 为无功功率的输出实际值; Q_{ref} 则为无功功率指令值。

随后的虚拟惯性环节的作用为模拟同步发电机的转子特性,进而为系统提供足够的惯性支撑,维持系统稳定。其作用过程见式(6)

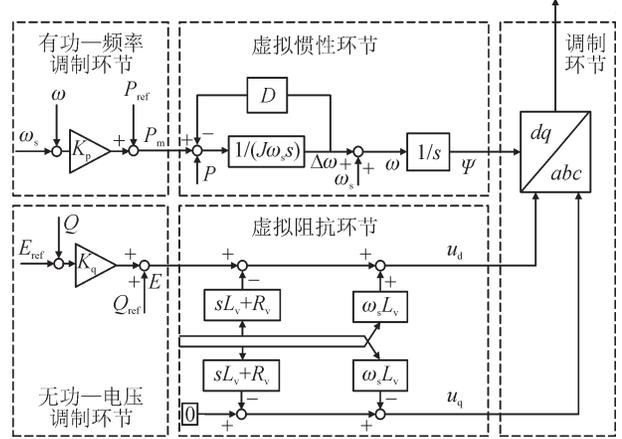


图6 储能侧变流器中的构网型控制框图

Fig. 6 Grid-forming control block diagram in energy storage side converter

$$\begin{cases} J\omega_s \frac{d\omega}{dt} = P_m - P - D(\omega - \omega_s) \\ \psi = \int \omega dt \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: D 为阻尼系数; J 为转动惯量系数; P 为构网型控制的有功功率输出值; ψ 为构网型控制系统内电势的相位值。

构网型控制除了模拟补充同步发电机的惯性之外,还涉及虚拟阻抗环节用于充当同步发电机的定子绕组的角色,见式(7)

$$\begin{cases} u_d = E - L_v \frac{di_d}{dt} - R_v i_d + \omega_s L_v i_q \\ u_q = -L_v \frac{di_q}{dt} - R_v i_q - \omega_s L_v i_d \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: L_v 为虚拟电感; R_v 为虚拟电阻; i_q 和 i_d 分别为输出电流值。其原理为VSG控制模拟定子阻抗,由提取到的内电势减去虚拟阻抗上的压降,进而得到 dq 轴的调制波电压 u_d 和 u_q 。

2 构网型储能系统的相关建模研究

在基于新能源发电的交流侧储能系统中,由于ESS与新能源发电系统紧密相连,假设产生的功率在注入电网之前能够通过带有构网型控制的储能侧变流器并进入ESS系统中,则可以达到和直流侧储能系统同样的效果^[24]。在此基础上,通过储能侧变流器的功率应该根据变流器的容量和存储进行调整。另外,由于新能源发电不稳定的问题,极有可能造成电网系统的电压跌落问题,故在本节首先提出基于新能源发电的交流侧储能系统的相关建模,并对于电网对称电压跌落下的基于VSG的构网型控制特性进行分析。

2.1 改进的构网型外部储能系统建模

假设传输线路上的串联电感阻抗为 X_g , 并以零时刻角度的电网电压 U_g 作为参考, 注入电网的功率可表示为

$$P = \frac{U_o U_g \sin \alpha}{X_g} \quad (8)$$

式(8)中, $U_o \angle \alpha = E \angle \delta - i(r_v + j\omega_{VSC} l_v)$ 为前文式(3)中所提到的变流器电压。

由式(8)可以看出, 此方程中有2个参数(电网电压和线路阻抗), 且有4个变量两两绑定。如果控制了其中2个变量, 则会自动确定另外2个变量。

在原有的新能源发电系统中, 在电网馈电模式下, 电能被直接作用在网侧变流器。因此, 变流器电压幅值和相位被间接改变。在该方案中, 需要另一个回路来抑制新能源的发电。

在ESS系统中, 在基于VSG的构网型控制下, 直接控制电压幅值和相位。既得功率是变流器和电网之间电压差的结果。而动态响应由阻尼和惯性设置定义。

根据上述分析, 如果要在新能源发电系统并入电网之前对系统中加入阻尼, ESS必须确定图5中基于新能源发电的交流侧储能系统中的公共耦合点(PCC)的电压, 并调节该点与电网之间的功率。另一方面, 在稳态状态下, 从PCC到电网的输出功率应等于新能源的发电量, ESS不应提供任何电力。为了实现这一点, 可以将式(1)中的参考功率 P^* 定义转换为从新能源发电注入PCC的瞬时功率。

图5可以用来说明这种配置下的发电情况。定义新能源发电产生的功率为 P_{wg} , ESS系统产生的功率为 P_{ess} , 注入电网的功率为 P_g 。最初假设电网以正常频率工作, 不需要下垂功率。此时注入电网的功率为发电功率, ESS功率为零, 故式(1)中的参考功率为实时测得的新能源发电功率, 即见式(9)

$$\begin{cases} P_{wg} = P^* = P_g = P_{wg0} \\ P_{ess} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

随后, 考虑到新能源发电产生的功率由 ΔP 改变, 见式(1), 由于阻尼和惯性的存在, PCC端到电网的相位不能瞬间改变, 而电网注入功率保持不变, 导致变化的发电功率进入ESS并由ESS存储, 见式(10)

$$\begin{cases} P'_{wg} = P_{wg} + \Delta P \\ P^* = P_g = P_{wg0} \\ P_{ess} = -\Delta P \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中, P'_{wg} 为此状态下新能源发电所产生的功率。

VSG控制检测到发电量变化并调整参考功率后, 由于在摇摆方程中功率不平衡, 即其参考功率不等于注入电网的输出功率 ($P^* \neq P_g$), 因此导致相位平稳变化, 为了解决新能源发电所引起的功率变化, ESS系统出力弥补最后的发电输出功率, 使输出功率等于初始参考值, 见式(11)

$$\begin{cases} P_{wg} = P^* = P_{wg0} + \Delta P \\ P_g = P_{wg0} + \Delta PG(t) \\ P_{ess} = -\Delta P + \Delta PG(t) \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中, $G(t)$ 为参考功率到实际输出功率的传递函数, 与虚拟惯性、阻尼和阻抗有关。

当输出功率等于发电量时, ESS处返回零输入, 系统稳定到新的稳定运行点, 见式(12)

$$\begin{cases} P_{wg} = P^* = P_g = P_{wg0} + \Delta P \\ P_{ess} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

在此过程中, 产生的功率由ESS的储能侧变流器经构网型控制后加入阻尼。由于在VSG外部储能系统结构中摇摆方程与VSG内部储能系统操作中使用的方程相同, 因此尽管它们的内部控制结构不同, 但它们将具有相同的响应^[25]。

2.2 电压跌落下的基于VSG特性构网型储能建模

对于依靠新能源发电的电力系统来说, 由于新能源发电的不稳定性, 其造成的电压跌落是难以避免的问题。因此如何在利用新能源发电的同时克服电压跌落并使电力系统稳定运行是亟待解决的问题。

首先电网电压跌落对于电力系统来说属于大干扰扰动, 在此情况下可使频率及功角发散, 且新能源发电所造成的电压跌落可造成从储能侧变流器构网型控制的输出电压和电网电压的电压差过大而使系统中的电力电子器件受到不可逆的损坏。因此需要分析VSG在电网电压跌落后的特性, 以保证系统实现低电压穿越。

功角曲线图见图7, 为电网电压正常运行、轻微跌落以及严重跌落时的功角曲线图。结合式(8)可知, 只要电网电压 U_g 跌落, 输送到电网的有功功率必然随之立即下降, 由 a 点下降到低于原有功率值的 b 或 c 点, 于是由于转子的功率不平衡而导致频率开始变化, 从而使功角增大。当电压轻微跌落时, 可通过功率同步控制环节最终会稳定在有功功率指令 P_{ref} 与新的功角曲线的交点 D 。但当电压严重跌落时, 有功功率指令值与功角曲线已无任何交点, 因此功率环同步环节已无控制作用, 即频率和功角会一直增加, 导致发电装置和电网失步, 导致系统不稳定。

当新能源发电不稳定造成电压跌落时, 来自网

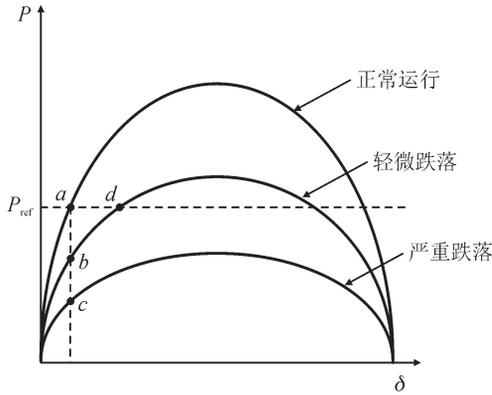


图7 功角曲线图

Fig. 7 Power angle curve

侧变流器需向电网提供足够的电压支撑。在发生对称性电压跌落时,可认为是三相对称的,因此只需分析一路即可。设电压跌落前电路中总阻抗为 $R_0 + j\omega_s L_0$, 跌落为 $R_F + j\omega_s L_F$, 设电压跌落前的VSG内电势幅值为 E_0 , 最终得到在电压跌落变流器的输出电流为 $i_F(t)$, 见式(13)

$$i_F(t) = i_{sF}(t) + (i_0 - i_{sF0})e^{-\frac{t}{\tau_F}} \quad (13)$$

式(13)中: $i_{sF}(t)$ 为电压跌落后的电流分量; i_0 为电压跌落的瞬时电流值; i_{sF0} 为电压跌落后的稳态电流值; τ_F 为电网电压跌落后的电流衰减时间常数, 且应对与电压跌落后的实际的线路阻抗来计算: $\tau_F = L_F/R_F$ 。

另外 $i_{sF}(t)$ 计算式为

$$i_{sF}(t) = \frac{E \sin(\omega_s t + \alpha - \varphi + \delta_{eg})}{\sqrt{R_F^2 + (\omega_s L_F)^2}} - \frac{U_{gF} \sin(\omega_s t + \alpha - \varphi)}{\sqrt{R_F^2 + (\omega_s L_F)^2}} \quad (14)$$

式(14)中: α 为电网电压的末相位; $\varphi = \arctan(\omega_s L_F/R_F)$ 。 i_{sF0} 和 $i_{sF}(t)$ 的区分之处就在于将 $i_{sF}(t)$ 计算公式中的 t 设置为0则可被转化为 i_{sF0} , 即

$$i_{sF0} = \frac{E \sin(\alpha - \varphi + \delta_{eg}) - U_{gF} \sin(\alpha - \varphi)}{\sqrt{R_F^2 + (\omega_s L_F)^2}} \quad (15)$$

i_0 则为

$$i_0 = \frac{E_0 \sin(\alpha - \varphi_0 + \delta_{eg0}) - U_{g0} \sin(\alpha - \varphi_0)}{\sqrt{R_0^2 + (\omega_s L_0)^2}} \quad (16)$$

式(16)中: $\varphi_0 = \arctan(\omega_s L_0/R_0)$; δ_{eg0} 为电压尚未跌落时的功角状态。

结合式(16)来看,在新能源发电不稳定而导致

电网电压跌落变流器同时承受着稳态和暂态电流的问题。电压跌落程度越深,回路阻抗越小,过流风险越高,系统稳定性越差。

3 电网电压跌落时的构网型控制策略

上文已对VSG外部储能系统的基本结构和运行原理做出解释分析,本节则将核心聚焦于储能侧变流器中的基于VSG的构网型控制环节。

当新能源不能稳定发电时,极易导致电网电压跌落的问题。基于此,本节提出基于低电压穿越(LVRT)的构网型控制策略,以保证系统在电压跌落时保持稳定运行。另外,结合电网对于低电压穿越时的运行标准,总结出对于构网型控制策略的核心控制目标:由上文描述可知,构网型控制技术具备支撑电网稳定的作用,因此在电网电压暂降时,尽可能利用构网型控制技术的主动调压功能以此补充无功支撑能力,并协调ESS和电网的功率流动,进而保证频率和电网稳定。其次,需防止变流器出现过流问题,以避免变流器损坏。

在此基础上,本节对于构网型控制策略中的功率环及虚拟阻抗环节进行改进设计,以达到电网电压跌落时保证系统稳定运行的要求。

3.1 功率环设计环节

首先电网电压跌落会导致电压幅值跌落,进而导致变流器的有功及无功输出能力衰减。而基于VSG的构网型控制策略对于有功功率输出的调节则是通过调节相位来实现,因此可能导致相角被过度调节导致频率及功角不稳定。另外由图6可知,由于惯性环节导致有功—频率调制环节对于有功功率环的控制相对滞后,有可能在电压跌落时仍未达到有功功率输出和指令值相等的控制目标,改变这一局面的解决措施就是将功角随时进行调整改变,但是随之而来的就是导致功角不稳定。因此可以在根源上解决这一问题,即在电压跌落的瞬间立即使有功功率环停止运作,这样做可使随后的惯性环节的输入功率无差值。因此系统的频率和功角可稳定在电压跌落前的水平,以继续维持电压跌落前的状态运作。

国标对于光伏电站以及风电场的相关要求中指出,基于VSG的构网型控制在电网电压跌落向电网提供的无功电流需保证

$$\begin{cases} i_q = 1.5 \times (0.9 - U_T) i_N & 0.2 \leq U_T \leq 0.9 \\ i_q = 1.05 \times i_N & U_T < 0.2 \\ i_q = 0 & U_T > 0.9 \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中: i_N 为 VSG 的额定电流; U_T 为并网侧点电压的标么值。

另外在图 6 的无功—电压调制环节中, 可使 VSG 控制自行根据闭环反馈偏差值为电网提供无功支撑, 构网型 VSG 输出无功功率也会自然地增加, 这也使得 VSG 无功支撑能力与式(17)存在差别。因此对于构网型控制结构, 在无功—电压调制环节的基础上进行改进并增设模式切换的控制方式, 见图 8。

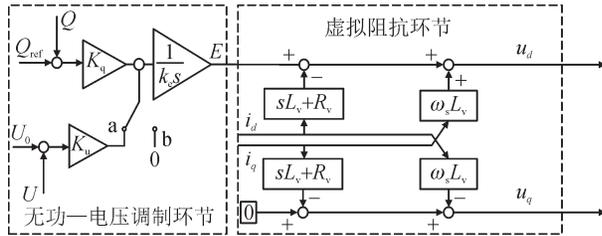


图 8 改进的无功—电压调制环节回路

Fig. 8 Improved reactive power-voltage modulation loop

当系统离网运行时, 开关闭合于 a 处, 并并入无功—电压下垂环节; 当系统并网运行时, 开关闭合于 b 处, 切出无功—电压下垂环节。对比传统的功率调制环节回路, 通过此模式的改进措施, 可防止功角波动, 从而限制输出电压及无功功率的明显变化差异。

文中设计的有功功率环和无功功率环可定义为协调控制, 其适用于电网电压强度较低的场景, 在电压跌落的瞬间立即停止有功功率环运作, 仅通过切入切出无功功率环的方式控制功角稳定进而补充电压值在正常范围之内, 并在发电量不足时保证系统稳定运行。

3.2 虚拟阻抗设计环节

在电网电压跌落后, 会出现故障电流。其中包含着周期分量和非周期分量。故障电流非周期分量与故障后的虚拟阻抗有关。因此虚拟阻抗环节的重点设计目标就是尽可能将电压跌落后引起的故障电流减小。

本节引入时变虚拟阻抗以限制构网型控制中所出现的瞬态冲击故障电流值, 见式(18)

$$Z_{vf} = R_{vf} + j\omega L_{vf} = \begin{cases} 0 & i_m^* \leq 1 \\ 10(i_m^* - 1.1)(R_{v0} + j\omega L_{v0}) & 1.1 < i_m^* \leq 1.2 \\ R_{v0} + j\omega L_{v0} & 1.2 < i_m^* \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中: Z_{vf} 为所引入的时变虚拟阻抗; i_m^* 为基于 VSG 的构网型控制最大故障相电流的标么值, 其计算公式见式(19)

$$i_m^* = \frac{\max(i_a, i_b, i_c)}{i_{pN}} \quad (19)$$

式(19)中, i_{pN} 表示构网型控制中相电流的额定输出值。

另外, 需要说明的是, 虚拟阻抗的作用主要体现在对输出电压的前馈修正。本节将时变虚拟阻抗 Z_{vf} 所产生的 dq 轴电压分量和基于 VSG 的构网型电压电流双闭环回路相结合。以便加快虚拟阻抗的限流效果, 且可降低高次谐波的影响, 以便提升构网型储能并网系统的稳定性。限流虚拟阻抗所产生的 dq 轴电压分量见式(20)

$$\begin{bmatrix} u_{dvf} \\ u_{qv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{vf} & -\omega L_{vf} \\ R_{vf} & \omega L_{vf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (20)$$

式(20)中: u_{dvf} 以及 u_{qv} 为限流虚拟阻抗的 dq 轴电压反馈分量; i_d 、 i_q 分别表示为构网型输出电流的 dq 轴分量。

4 仿真验证

为验证构网型协调储能控制在面对故障时的动态响应能力, 即是否能够为系统提供稳定的电压支撑和功率补偿, 文中基于 MATLAB/Simlink 软件环境下对上述控制策略进行仿真验证, 仿真时长一共为 4 s, 其主要参数见表 1。

表 1 仿真主要参数

Table 1 Main parameters of simulation

参数名称	取值
直流电压 U_{dc}/V	2 200
电网电压额定幅值 U_g/V	311
额定容量 S_N/kVA	10
滤波电感 L_f/mH	4
滤波电容 $C_f/\mu F$	10
滤波电感寄生电阻 R_{lf}/Ω	0.1
滤波电容寄生电阻 R_{cf}/Ω	1
额定频率 f_n/Hz	50
阻尼系数 D	4 523
惯量 J	0.5

首先验证此构网型协调储能控制的调频能力。仿真总时间为 4 s, 其电网电压仿真结果见图 9。设置此构网型协调储能控制在第 1.0~2.0 s 时频率下降 0.5 Hz。此仿真在 1.0~4.0 s 时的频率波形, 见图 10。

由图 9 可看出, 系统频率在第 1.0~2.0 s 下降后基于 VSG 的构网型协调储能控制对于电网电压的输出并无较大的影响。另外由图 10 可看出, 系统在并入 ESS 系统运行后, 其频率在 0.2~0.5 s 左右可恢复至 50 Hz 左右的额定值, 在 1.0~2.0 s 给定频率值下降 0.5 Hz 后, 其大约在 2.1 s 迅速做出响应, 并在

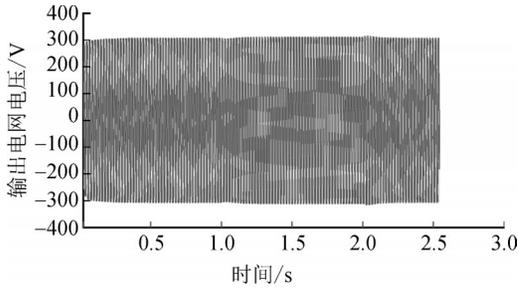


图9 电网电压仿真结果

Fig. 9 Simulation results of grid voltage

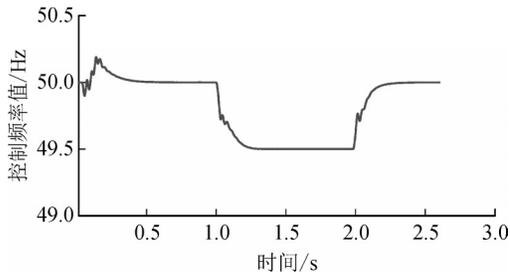


图10 仿真1.0~4.0 s时频率波形

Fig. 10 Frequency waveform of 1.0~4.0 s simulation

2.5 s左右恢复至50 Hz的额定频率。因此可证明此构网型协调储能控制具备良好的动态响应性能,且有功—频率调制环节起到了作用。

文中利用仿真中所设置的电压跌落功能来模拟实际场景中新能源发电不足时的状态。因此需要验证构网型协调储能控制策略在电网电压跌落时的动态响应性能及无功补偿能力。仿真时间共为4 s。初始状态下的输出额定功率为100 kW,输出无功功率为0 var。设置电网电压在第1.0~2.0 s发生0.5 p.u.的三相对称跌落。见图11,为电网电压在0~4 s发生电压跌落时的仿真波形,可以看到在第1.0~2.0 s时由于电压跌落的原因,波形虽迅速衰减,但在此期间并未达到50%的跌落深度,因此可证明此控制策略在新能源发电不足时有一定的电压支撑能力,并且后来在2.0 s后立刻恢复到正常的运行状态。见图12,电压跌落0.5 p.u.时加入构网型协调储能控制的电流波形。从图12可以看出在电网电压跌落和恢复时刻其控制策略的瞬态电流幅值被限制在电流阈值之内,且最后的输出电流波形趋于稳定,静态及瞬态情况时都未出现严重的过流现象。因此可证明上文中的虚拟阻抗环节的限流达到了如期的效果。

电压跌落0.5 p.u.时有功及无功功率波形见图13。从图13可以看到在电网电压跌落期间,基于VSG的构网型控制策略的输出有功功率并无太大影响,因此可证明上文中对于有功功率环的冻结设置是有效的,其功角并未发散。且无功功率在第1.0~2.0 s

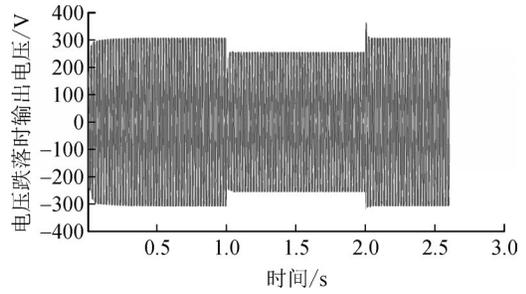


图11 电压跌落0.5 p.u.时加入构网型控制电压波形

Fig. 11 Waveform of grid control voltage when voltage drops by 0.5 p.u.

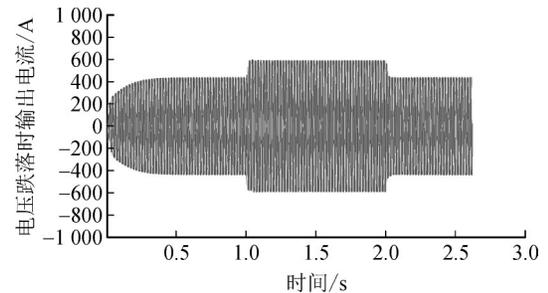


图12 电压跌落0.5 p.u.时加入构网型控制电流波形

Fig. 12 Waveform of control current when voltage drops by 0.5 p.u.

抬升到一定水平后,恢复到正常初始额定值。无功功率并无明显的波动,因此也间接证明了文中所采用的改进的无功—电压调制环节回路设置成功。另外图14可知,在电网电压跌落期间,系统频率始终在50 Hz左右波动。综上所述文中所设计的构网型协调控制策略可以在新能源发电不充足期间维持系统的稳定,在不过流的同时能够保证储能侧变流器的输出满足要求的无功电流。且最后的输出有功及无功功率均恢复至额定值,且输出功率和电流波形稳定,进而证明了所提控制策略的有效性。

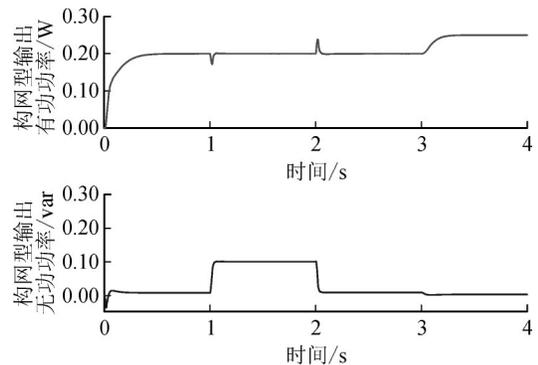


图13 电压跌落0.5 p.u.时有功及无功功率波形

Fig. 13 Waveforms of active and reactive power when the voltage drops by 0.5 p.u.

5 结语

文中提出一种基于新能源发电的构网型协调

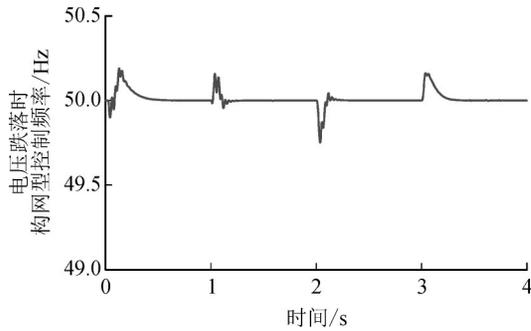


图 14 电压跌落 0.5 p.u. 时系统频率波形

Fig. 14 System frequency waveform when the voltage drops by 0.5 p.u.

储能控制策略,并以电网电压跌落时来模拟新能源发电不足时系统状态,并对于其动态及静态特性进行了分析。可知构网型控制策略模拟了传统的同步发电机的机械和电磁特性,以达到和其近乎相同的惯性和阻尼支撑,但在电网电压跌落时容易出现稳态和瞬态过流的问题。文中在此基础上提出的改进式构网型控制策略,在电压跌落期间,该策略可有效为系统提供电压支撑,可同时防止功角的发散,对于虚拟阻抗环节的设计可改善输出的无功功率。并在构网型并网运行时切断无功—电压下垂调制环节,在电压跌落时冻结有功功率环,通过有功和无功的协调控制为系统提供无功支撑,维持了系统的稳定。

参考文献:

- [1] 李建林,郭斌琪,牛 萌,等. 风光储系统储能容量优化配置策略[J]. 电工技术学报,2018,33(6):1189-1196.
LI Jianlin, GUO Binqi, NIU Meng, et al. Optimal configuration strategy of energy storage capacity in wind/PV/storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1189-1196.
- [2] 马 兰,谢丽蓉,叶 林,等. 基于混合储能双层规划模型的风电波动平抑策略[J]. 电网技术,2022,46(3): 1016-1029.
MA Lan, XIE Lirong, YE Lin, et al. Wind power fluctuation suppression strategy based on hybrid energy storage bi-level programming model[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1016-1029.
- [3] LIU Juelin, YANG Zhifang, YU Juan, et al. Coordinated control parameter setting of DFIG wind farms with virtual inertia control[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 122(12): 106167.
- [4] WANG H, CHEN Z, JIANG Q. Optimal control method for wind farm to support temporary primary frequency control with minimised wind energy cost[J]. IET Renew Power Gener, 2015, 9(4): 350-359.
- [5] WANG Yi, MENG Jianhui, ZHANG Xiangyu, et al. Control of PMSG-based wind turbines for system inertial response and power oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 565-574.
- [6] OCHOA D, MARTINEZ S. Fast-frequency response provided by DFIG-wind turbines and its impact on the grid[J]. IEEE Trans Power Syst. Sept., 2017, 32(5): 4002-4011.
- [7] 杨 安,杨江涛,刘 佳,等. 独立新能源系统中考虑小型压缩空气储能的容量配置[J]. 电力科学与工程, 2017, 33(6): 12-18.
YANG An, YANG Hongtao, LIU Jia, et al. Capacity configuration considering small compressed air energy storage in independent photovoltaic system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(6): 12-18.
- [8] HUANG Linbin, XIN Huanhai, WANG Zhen, et al. A virtual synchronous control for voltage-source converters utilizing dynamics of DC-link capacitor to realize self-synchronization[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1565-1577.
- [9] FANG Jingyang, LI Hongchang, TANG Yi, et al. Distributed power system virtual inertia implemented by grid-connected power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8488-8499.
- [10] CAO Yijia, WANG Weiyu, LI Yong, et al. A virtual synchronous generator control strategy for VSC-MTDC systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 750-761.
- [11] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.
- [12] CHEN Junru, LIU Muyang, O' DONNELL T. Replacement of synchronous generator by virtual synchronous generator in the conventional power system[C]//2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). GA, USA: IEEE, 2019: 1-5.
- [13] CHEEMA K M, MILYANI A H, EL-SHERBEENY A M, et al. Modification in active power-frequency loop of virtual synchronous generator to improve the transient stability[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021(128): 106668.
- [14] CHEN Junru, O' DONNELL T. Parameter constraints for virtual synchronous generator considering stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2479-2481.
- [15] CHEN J, O' DONNELL T. Analysis of virtual synchronous generator control and its response based on transfer functions[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(11): 2965-2977.
- [16] 李建林,丁子洋,刘海涛,等. 构网型储能变流器及控制

- 策略研究[J]. 发电技术, 2022, 43(5): 679-686.
- LI Jianlin, DING Ziyang, LIU Haitao, et al. Research on grid-forming energy storage converters and control strategies [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 679-686.
- [17] 刘京波, 吴林林, 李 琰, 等. 构网型光储混合供电系统及其协调控制策略[J]. 电力电子技术, 2023, 57(1): 92-95.
- LIU Jingbo, WU Linlin, LI Yan, et al. Grid hybrid power supply system with optical storage and its coordinated control strategy[J]. Power Electronics Technology, 2023, 57(1): 92-95.
- [18] 陈凌宇, 刘 敏, 孙 桐, 等. 基于电池储能的单级式构网型不间断供电系统[J]. 电力电子技术, 2022, 56(5): 1-4.
- CHEN Lingyu, LIU Min, SUN Tong, et al. Single stage grid formed uninterruptible power supply system based on battery energy storage[J]. Power Electronics, 2022, 56(5): 1-4.
- [19] 董旭柱, 华祝虎, 尚 磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.
- DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.
- [20] 吴 琛, 刘晨曦, 黄 伟, 等. 提升新能源电力系统稳定性的构网型变流器选址定容方法[J/OL]. 电力系统自动化: 1-8[2023-01-23] www.aeps-info.cn/aeps/article/abstract/20220620002.
- WU Chen, LIU Chenxi, HUANG Wei, et al. Method of site selection and constant capacity for grid-type converter to improve the stability of new energy power system[J/OL]. Power System Automation: 1-8[2023-01-23] www.aeps-info.cn/aeps/article/abstract/20220620002.
- [21] 秦世耀, 齐 琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1314-1334.
- QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Research status and prospect of voltage source grid-connected wind turbines [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1334.
- [22] 张英杰. 构建以新能源为主体的新型电力系统的发展路

(上接第55页)

- Systems, 2018, 33(3): 2882-2894.
- [25] BANFIELD B, ROBINSON D A, AGALGAONKAR A P. Distributed MPC of residential energy storage for voltage regulation and peak shaving along radial distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(2): 1413-1424.
- [26] ARAKI H. International symposium on mathematical problems in theoretical physics[J]. Lecture Notes in Physics, 1975(39): 13-29.
- 径研究[J]. 电工技术, 2022(18): 172-174.
- ZHANG Yingjie. Research on the development path of building a new electric power system based on new energy sources[J]. Electric Engineering, 2022(18): 172-174.
- [23] 余 果, 吴 军, 夏 热, 等. 构网型变流器技术的发展现状与趋势研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(9): 65-70.
- YU Guo, WU Jun, XIA Re, et al. Study on the status quo and development trend of grid-forming converter technology [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(9): 65-70.
- [24] 李相俊, 官亦标, 胡 娟, 等. 我国储能示范工程领域十年(2012—2022)回顾[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9): 2702-2712.
- LI Xiangjun, GUAN Yibiao, HU Juan, et al. Review of energy storage application in China from 2012 to 2022[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2702-2712.
- [25] 戴汉扬, 肖 雄, 宋新立, 等. 适用于大电网动态仿真的电化学储能电站多场景仿真建模及应用研究[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1828-1837.
- DAI Hanyang, XIAO Xiong, SONG Xinli, et al. Multi-scenario simulation modeling and application research of electrochemical energy storage power station for dynamic simulation of large power grid[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1828-1837.
- 郑云平(1994—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为可调负荷控制及储能优化控制工作(E-mail: zyp_mess@163.com)。
- 焦春雷(1983—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为网源协调技术(E-mail: jiaochunlei07@163.com)。
- 亚夏尔·吐尔洪(1994—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为可调负荷控制及负荷数据通信技术(E-mail: 532130292@qq.com)。
- 赵立斌(1995—), 男, 本科、工程师, 研究方向为地区电网网源协调、新能源并网检测(E-mail: 1938970050@qq.com)。
- [27] ZHOU Hong, CHEN Shi, LAI Jingang, et al. Modeling and synchronization stability of low-voltage active distribution networks with large-scale distributed generations[J]. IEEE Access, 2018(6): 70989-71002.
- 李 盈(1994—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向为柔性直流与储能技术(E-mail: 15510779691@163.com)。