

虚拟同步发电机并机黑启动技术研究

杨帆¹,王换民²

(1.上海弘正新能源科技有限公司,上海 201400;

2.商洛学院 电子信息与电气工程学院,陕西 商洛 726000)

摘要:随着电力电子技术的发展,具有虚拟同步发电机(VSG)功能的微网型储能逆变器也得到了广泛应用。在虚拟同步发电机技术中由于惯性调频环及调压环的存在,逆变器在并网时可自主实现电网调频调压功能,离网时也可实现无通信并机。但是在微网系统中由于负载和变压器的接入,逆变器离网时并机黑启动技术是亟待解决的问题之一。通过理论仿真分析,提出了一种工频同步的软启动方法,可实现平滑的母线电压建立。在软启动过程中两台VSG并机功率均衡,实现了整个系统黑启动的完成。最后通过实验分析,验证了VSG并机黑启动控制策略的有效性。

关键词:工频同步;黑启动;虚拟同步发电机

中图分类号:TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24673

Implementation of Parallel Black Start of Virtual Synchronous Generator

YANG Fan¹, WANG Huanmin²

(1. Shanghai Hongzheng New Energy Technology Corporation, Shanghai 201400, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shangluo University,
Shangluo 726000, Shaanxi, China)

Abstract: With the development of power electronics technology, microgrid type energy storage inverters with virtual synchronous generator (VSG) function have also been widely used. In VSG technology, due to the presence of inertial frequency regulation loop and voltage regulation loop, the inverter can realize the grid frequency regulation and voltage regulation function independently when it is connected to the grid, and it can realize the parallel power without communication when it is off-grid. However, in the microgrid system, due to the access of load and transformer, the parallel black start technology is one of the urgent problems to be solved when the inverter is off-grid. Through theoretical simulation analysis, an industrial frequency synchronous soft start method was proposed, which can realize smooth bus voltage establishment. The parallel power equalization of two VSGs during the soft start process achieved the completion of the black start of the whole system. Finally, the effectiveness of the parallel VSG black start control strategy was verified through experimental analysis.

Key words: frequency synchronization; black start; virtual synchronous generator (VSG)

虚拟同步发电机(VSG)控制思想^[1-2]的发展,使得风电、光伏、储能等电力电子变换器呈现出同步发电机的运行特性,随着新能源入网占比的逐年递增,虚拟同步发电机技术是提高电力系统稳定性的一种有效方法。

尽管众多学者、组织实现虚拟同步发电机的方式并不同,但总体框架基本一致,主要包括同步发电机机电数学模型、有功调节和无功调节三

大部分^[3-4]。其中机电方程用来模拟发电机运行状态,有功调节主要模拟原动机及转子运动方程,无功调节则是模拟电压励磁环节。目前针对虚拟同步发电机的研究已经较为普及,但是对于黑启动相关内容的研究还是相对较少^[5-6]。文献[7]选择了多VSG串行黑启动恢复策略,由于串行策略由单机运行带动实现整个系统黑启动,容量较小,在黑启动操作流程中需要切除大量负载,

基金项目:陕西省教育厅一般专项科研计划项目(22JK0366)

作者简介:杨帆(1992—),男,硕士,工程师,主要研究方向为储能控制算法,Email:yfyangfanyf@qq.com

启机流程复杂且会增加额外的逻辑设计,适应场景有一定的局限性。文献[8]针对传统逆变器多模块并联策略进行分析,提出改进策略。虽然可以实现VSG并联离网启动,但是每台VSG并离网算法需要切换,同时存在多个PI控制器的切换,实现难度较大。文献[9]提及一种电压零启的单机黑启动策略但不作为其文章主要内容,并未针对并机系统黑启动的问题,且缺乏实验验证。文献[10]基于风电场运行环境下,在双馈异步风力发电机直流母线上引入直流电压源来实现黑启动,由于缺乏储能单元使得黑启动方案较为复杂,且单机黑启动容量有限。文献[11]提出了一种基于风储联合系统的受端电网三阶段协调恢复策略,通过储能系统在初期利用V/F控制实现电压建立,中期风机启动参与电压支撑,后期完成系统黑启动并转换为功率控制模式。其初期阶段类似于微网黑启动,但是V/F控制若想实现并机黑启动需要加入均流措施,适用范围有限。

针对微网系统黑启动方案有两大难点:一是大多数配电系统有变压器和电力电子设备的母线电容参与,所以在电压建立过程中避免电流冲击是很有必要的;二是当系统供电及重要负荷较重,超出一台VSG额定容量时,两台VSG先后启机方案无法实现,对等控制下并联同时启机是一种有效的方案。本文从逆变器控制器角度出发,首先阐明所采用VSG的框架^[12],主要包括功频环路、无功电压环路以及发电机定子电压模型;其次介绍VSG并机离网启机的流程和实现方式;最后通过仿真和实验空载、带载情况下的启机,验证本文方法的可行性。

1 拓扑及VSG原理

1.1 拓扑结构

储能变流器离网并机拓扑结构由两台独立的“Ⅰ”字型逆变电路组成,如图1所示, U_{dc} 为稳定直流源来替代储能电池,通常储能系统电池与逆变器容量相匹配,故一组电池对应一台VSG。当需要两台VSG对应一组电池时,并联系统还需要载波同步等方案抑制零序环流,本文不作讨论。 C_f 与 L_f 分别为滤波电容和滤波电感,两台VSG分别通过断路器连接至Pcc点处, Z_L 为负载的统称。突投变压器易造成电压偏磁以及励磁电流过大等过流跳闸现象,所以并机黑启动的关键点在于:1)交流母线电压零启的缓慢建立,从而实现电流软

启;2)电压软启过程中VSG的均流问题。

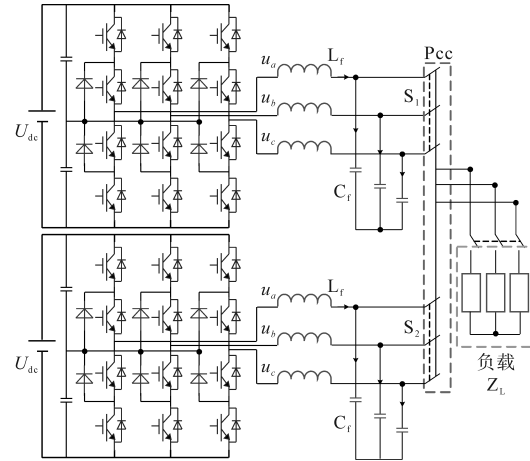


图1 VSG并联拓扑结构

Fig.1 VSG parallel topology

1.2 VSG原理

有功调节环节可由同步发电机转子运动方程表示,如图2所示。有功功率对频率的传递函数可简化为一阶系统。

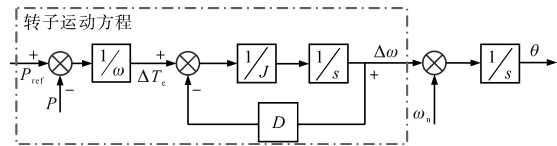


图2 功频调节控制器

Fig.2 Power frequency controller

转子运动方程表达式为

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D\Delta\omega = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D\Delta\omega \quad (1)$$

其中

$$d\delta/dt = \Delta\omega \quad d\theta/dt = \omega$$

式中: J 为转动惯量; T_e, P_e 分别为VSG电磁转矩和输出有功功率; T_m, P_m 分别为原动机机械转矩和原动机输出有功功率; δ, θ 分别为功角和电角度; D 为阻尼系数; ω 为角速度。

有功调节环节由于阻尼、惯量的存在,可实现离网投切负载时频率的惯性变化。

定子电压数学模型对于VSG稳定性至关重要,其控制方程可等效为虚拟阻抗的一种实现方式:

$$\begin{cases} U_d = -ri_d + \omega L_q i_q \\ U_q = E - ri_q - \omega L_d i_d \end{cases} \quad (2)$$

式中: r 为虚拟电阻; L_d, L_q 为虚拟电感的交、直轴分量; E 为无功调节环节输出的电压给定值; U_d, U_q 为定子电压的交、直轴分量,即电压电流双环的控制目标; i_d, i_q 为电感电流采样值的交、直轴分量。

无功调节环节由无功电压下垂环节组成,如图3所示。

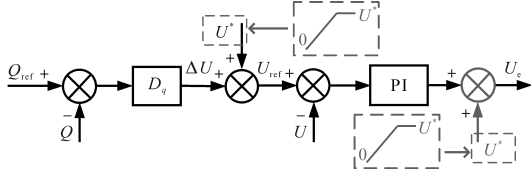


图3 无功调节环节控制框图

Fig.3 Control block diagram of reactive power regulation segment

图3中,PI控制器调节输出励磁电压,相对于传统VSG可得到准确的无功-电压下垂关系,并自适应调节因虚拟阻抗带来的端电压变化。可得 U_e 表达式为

$$U_e = [(Q_{ref} - Q) \cdot D_q + U^* - U_m] \cdot (K_p + \frac{K_i}{s}) \quad (3)$$

式中: U_e 为励磁电压; Q_{ref} , Q 分别为无功功率参考值和实际无功输出; D_q 为无功电压下垂系数; U^* , U_m 分别为控制目标电压和实际输出电压幅值; K_p , K_i 为PI控制器参数。

由于PI响应速度快, U_e 及VSG输出电压的建立可等效为阶跃响应。当带电容型负载或连接变压器黑启动时,易造成瞬间电流过大或励磁电流冲击,从而引发过流跳闸等启动失败的风险。同时仅靠PI的积分作用对励磁电压进行调节,在投切负载的过程中也会造成电压的较大波动。

因此采用额定电压 U_n 为斜坡函数的模式, $U^*(t)=U_n t$ 。1s内控制电压目标上升至额定值,可保证VSG输出电压的一个软启建立,另外引入该值作为PI输出的前馈值,可极大提高投切负载的能力,减轻积分控制器压力。

2 VSG并机小信号建模

由于VSG模型由虚拟同步发电机转子运动方程、励磁电压环节和定子电压数学模型组成,任何一参数选取不合适都可能导致系统不稳定。本小节通过对VSG并机系统搭建如图4所示的小信号模型,分析阻尼系数 D 、转动惯量 J 、无功下垂系数 D_q 和虚拟阻抗 Z 等关键参数对其稳定性的影响,从

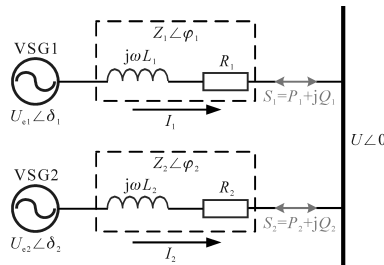


图4 并机简化模型图

Fig.4 Parallel simplified model diagram

而选取合适的参数范围。需要强调的是稳态工作时的VSG参数对于黑启动的暂态过程也同样适用。

图4中, $U_{ei}(i=1,2)$ 为励磁电压; δ_i 为VSG功角; $j\omega L_i$ 为线路及虚拟感抗之和; R_i 为线路及虚拟电阻之和; Z_i 为合成阻抗; φ_i 为阻抗角; U 为并联母线电压,定义为相位参考电压,相角为0。

为了等效同步发电机得到有功-频率和无功-电压下垂关系,通过虚拟阻抗设置阻抗角接近于0实现,对应式(2)中 $r=0$, $L = \sqrt{L_d^2 + L_q^2}$,于是得到如下关系:

$$\begin{cases} P = (UU_e \sin \delta) / Z \\ Q = (UU_e \cos \delta - U^2) / Z \end{cases} \quad (4)$$

结合式(1)、式(3)、式(4)分别对有功功率 P 、无功功率 Q 、角速度 ω 及励磁电压 U_e 添加扰动,并考虑实际功率采样计算环节中的延迟,用一阶低通滤波代替。设置VSG黑启动并联系统静态工作点:交流母线电压幅值 $U=311$ V,额定角频率 $\omega_n=314$ rad/s,励磁电压 $U_e=312$ V,一阶低通滤波器截止频率 $\omega_c=130$ Hz,等效输出阻抗 $Z=2 \Omega$,VSG输出功角 $\delta=0.0016$ rad,VSG模型参数设计为:阻尼系数 $D=5$,转动惯量 $J=0.3$ kgm²,无功电压下垂系数 $D_q=0.0002$,电压控制环路 $K_p=0.1$, $K_i=200$ 。综上所述得到关于功角 δ 的小信号方程:

$$aS^5 \hat{\delta} + bS^4 \hat{\delta} + cS^3 \hat{\delta} + eS^2 \hat{\delta} + fS \hat{\delta} + g \hat{\delta} = 0 \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} a = J\omega_n \\ b = 2J\omega_n\omega_c + D\omega_n + \frac{J\omega_n\omega_c D_q K_p U \cos \delta}{Z} \\ c = 2D\omega_n\omega_c + J\omega_n\omega_c^2 + \frac{J\omega_n\omega_c D_q K_i U \cos \delta}{Z} + \frac{J\omega_n\omega_c^2 D_q K_p U \cos \delta}{Z} + \frac{D\omega_n\omega_c D_q K_p U \cos \delta}{Z} \\ e = D\omega_n\omega_c^2 + \frac{J\omega_n\omega_c^2 D_q K_i U \cos \delta}{Z} + \frac{D\omega_n\omega_c D_q K_i U \cos \delta}{Z} + \frac{D\omega_n\omega_c^2 D_q K_p U \cos \delta}{Z} + \frac{\omega_c U U_e \cos \delta}{Z} \\ f = \frac{D\omega_n\omega_c^2 D_q K_i U \cos \delta}{Z} + \frac{\omega_c^2 U U_e \cos \delta}{Z} + \frac{\omega_c^2 D_q K_p U^2 U_e}{Z^2} \\ g = \frac{\omega_c^2 D_q K_i U^2 U_e}{Z^2} \end{cases}$$

求解式(5)得到5个特征根,其动态根轨迹图如图5所示。

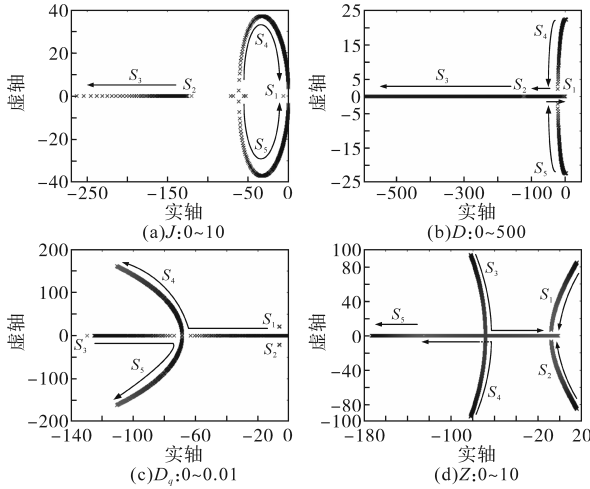


图5 动态根轨迹图

Fig.5 Dynamic root locus diagram

由图5a可以看出,随着转动惯量 J 的增大,有两个特征根逐渐远离实轴,系统响应速度加快,振荡加剧,随着 J 的进一步增大,特征根将向虚轴靠拢,系统稳定性逐渐减弱。由图5b可以看出,随着阻尼系数 D 的增大,有两个特征根逐渐从正半轴跨越虚轴,并缓慢向实轴靠拢,此时系统由不稳定状态转变为稳定状态,且系统阻尼增强,但随着 D 的继续增大,有一个实数特征根又向虚轴靠近,稳定性也会随之变差。图5c中,随着无功电压下垂系数 D_q 的逐渐增大,有一个实数根从零点逐渐远离虚轴并变为虚数根,稳定性增强的同时,响应速度逐渐变快。图5d中,随着线路等效阻抗的增大,两个正半轴共轭根跨越虚轴,系统由不稳定状态变为稳定状态,且另外两个共轭根靠近实轴并转化为两个实数根,系统变为过阻尼状态。

3 VSG 离网并机黑启动流程

针对图1所示拓扑并机启动,因启动完成后VSG控制方式可自主实现无通信的并联功率平均分配,所以为保证VSG启机过程中也能做到功率均分,仅需两台VSG时刻保持电压、相位控制目标相等即可实现。并机黑启动流程图如图6所示,具体步骤如下:

- 1) 闭合 S_1, S_2 开关;
- 2) 功率环参考值 P_m, Q_{ref} 设置为0;
- 3) 相角默认置0,电压斜坡函数目标初值赋0;
- 4) 同时进行启机操作。

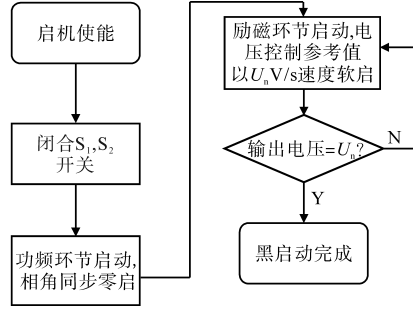


图6 并机黑启动流程图

Fig.6 Flow chart of VSG parallel black start

步骤1)在电压未建立之前闭合并网开关,可保证电压软启过程中对变压器及电容等平缓通电。步骤2)中功率环参考值类似于PQ控制指令值,在并网后产生额定频率及电压的偏移从而输出下垂系数对应的有功、无功功率,黑启动过程中无需两台VSG间有能量流动,故需将 P_m, Q_{ref} 设置为0。步骤3)、步骤4)为并机黑启动关键,意在使两台VSG均在相角为0处同时进行电压零启,一方面可以保证电压软启过程中两台VSG的基准调制波一致,依赖有功-频率、无功-电压关系实现均流,另一方面在电压较小时完成变压器的励磁等。

4 仿真与实验

4.1 仿真实验

本文搭建Simulink仿真模型,验证对无功电压环路的改动及所述离网并机黑启动策略,按照图5步骤进行启机。VSG1与VSG2在0s带本地负载零压启动,负载在额定电压等级下为20kW+10kvar,1.2s时再投20kW负载。仿真过程中两台VSG软硬件参数完全一致,具体参数设计如下: $C_f=20\mu F, \omega_n=314\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}, J=0.3\text{ kg}\cdot\text{m}^2, D_q=0.06, X_d=2\text{ mH}, L_f=2\text{ mH}, U_{dc}=700\text{ V}, U^*=220\text{ V}, D=5, X_q=2\text{ mH}$ 。其中 X_d, X_q 分别为虚拟电感 L_d, L_q 对应的虚拟阻抗。

图7为仿真过程的波形。由图7可以看出,电压0s时以311V/s的速率开始软启,1s时上升至额定值。由于负载固定,随着电压的逐渐爬升,电流也会随着增大,1s时功率到达额定值。1.2s再投20kW负载时,频率惯性降低,无功功率因为耦合关系出现波动。整个过程中,由于两台VSG对母线的共同调节作用,进而可以在暂态和稳态均实现对有功功率、无功功率的均分。需要强调的是,在1s功率到达稳态时,频率还未到达稳态的原因是VSG调频环路转动惯量的作用。

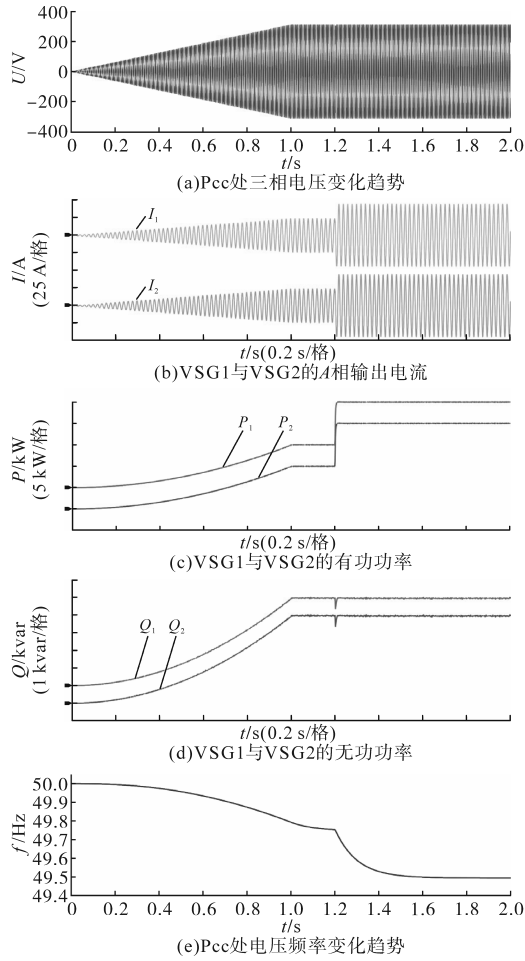


图7 仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms

4.2 实验验证

基于上文阐述的离网并机VSG黑启动策略,在此搭建两台500 kW容量的“ I ”字型三电平储能变流器,嵌入VSG控制算法并进行实验验证,具体实验平台参数如下: $C_f=20 \mu\text{F}$, $\omega_n=314 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $J=0.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $D_q=0.00004$, $X_d=0.5 \text{ mH}$, $L_r=0.5 \text{ mH}$, $U_{dc}=900 \text{ V}$, $U^*=230 \text{ V}$, $D=507$, $X_q=0.5 \text{ mH}$ 。实验过程的波形如图8所示。其中,图8a为两台VSG并机离网空载黑启动波形,图8b为两台VSG并机离网带载黑启动波形,通过400 V/630 V双绕组400 V/630 V变压器带100 kW负载。在此基础上继续投300 kV·A、功率因数0.9的负载,波形如图8c所示。

如图8a所示, U_1 与 U_2 为交流端口电压,由于VSG并联输出所以 U_1 与 U_2 相等, I_1 与 I_2 分别为两台VSG输出电流,大小相等方向相反。可以看出此时空载并机黑启动,启动过程中电压无畸变,软启平滑。由于没有带载,故只存在空载环流。

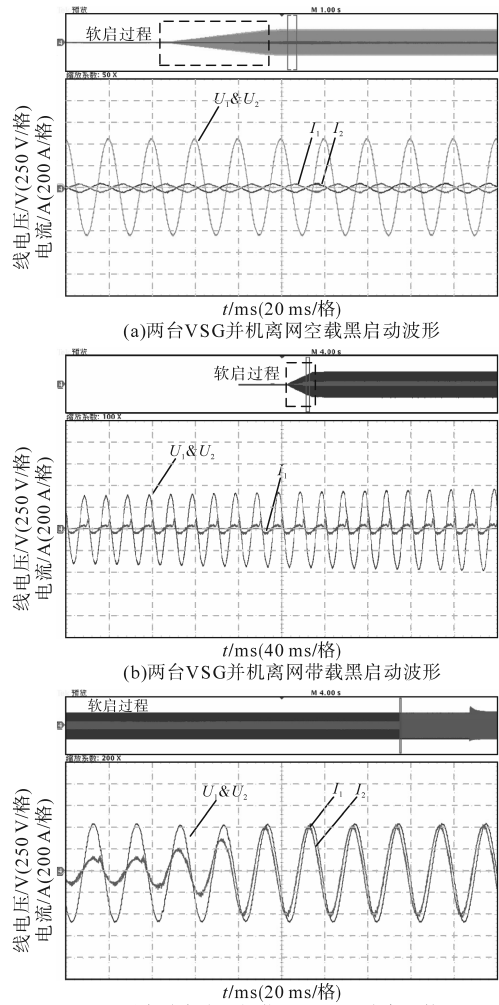


图8 实验波形

Fig.8 Experimental waveforms

由图8b可看出,通过400 V/630 V变压器带100 kW负载启动过程中,无电流冲击,电压无畸变,软启平滑稳定,电流略有畸变,主要为励磁电流谐波导致,软启完成后,畸变得明显改善。

图8c在图8b基础上再投入300 kV·A、功率因数0.9的负载,可以看出投载瞬态两台VSG电流大小相等,方向同相,全过程均流效果良好,由于励磁电压环输出前馈的作用,带载瞬态VSG输出母线电压基本无波动,无明显调节过程。

5 结论

针对传统VSG控制器模型,通过阐述其基本原理和对励磁电压环的改动,说明离网VSG并机黑启动方案的可行性。然后通过并机黑启动小信号建模,分析参数对并机系统的影响。其次对黑启动的流程和必要操作进行描述,最后通过仿真和实验进行验证,结果表明,无论是空载还是

带变压器等非线性负载,并联系统均可以实现系统的平稳启动,本文提出虚拟同步发电机并机黑启动技术方案可行有效。

参考文献

- [1] 郑天文,陈来军,陈天一,等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):165-175.
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [2] 李春,马凡,胡祺. 独立电力系统中基于模式切换的虚拟同步发电机控制方法[J]. 高电压技术,2022,48(9):3474-3483.
LI Chun, MA Fan, HU Qi. Virtual synchronous generator control method based on mode switching in isolated power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3474-3483.
- [3] 兰征,刁伟业,曾进辉,等. 含异构微源孤岛微电网内虚拟同步发电机预同步控制策略[J]. 电力系统自动化,2022,46(19):154-161.
LAN Zheng, DIAO Weiye, ZENG Jinhui, et al. Pre-synchronization control strategy of virtual synchronous generator in islanded microgrid with heterogeneous distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 154-161.
- [4] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2591-2603.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [5] 谢楠,杨沛豪,何萍,等. 风光储微电网-火电机组黑启动全过程储能控制策略研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2023,35(2):75-82,93.
XIE Nan, YANG Peihao, HE Ping, et al. Research on energy storage control strategy in the whole process of wind solar energy storage microgrid thermal power unit black start[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(2): 75-82, 93.
- [6] 厉成元,张超,李哲,等. 储能系统黑启动功率分配控制策略[J]. 电气传动,2022,52(15):31-37,80.
LI Chengyuan, ZHANG Chao, LI Zhe, et al. Power distribution control strategy of energy storage system in black start process[J]. Electric Drive, 2022, 52(15): 31-37, 80.
- [7] 石荣亮,张兴,刘芳,等. 基于虚拟同步发电机的孤立微网黑启动方案研究[J]. 太阳能学报,2017,38(10):2857-2864.
SHI Rongliang, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Research of black-start schemes of isolated microgrid based on virtual synchronous generator[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(10): 2857-2864.
- [8] 刘建平,侯凯,何安然,等. 5 MW 储能虚拟同步发电机孤岛启动与同期控制技术[J]. 电气传动,2019,49(5):73-78.
LIU Jianping, HOU Kai, HE Anran, et al. Control techniques of islanded microgrid system startup and synchronization for 5 MW energy storage virtual synchronous generator[J]. Electric Drive, 2019, 49(5): 73-78.
- [9] 付华,刘公权,齐晨飞,等. 计及微电网黑启动的虚拟同步发电机调频策略[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(14):59-68.
FU Hua, LIU Gongquan, QI Chenfei, et al. Frequency regulation strategy of a virtual synchronous generator-based microgrid considering the black start process[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 59-68.
- [10] 朱凌燕,潘再平,许国东. 采用改进虚拟同步控制的双馈型风电场黑启动方案[J]. 太阳能学报,2021,42(4):162-167.
ZHU Lingyan, PAN Zaiping, XU Guodong. Black start scheme of dfig-based wind farm adopting improved virtual synchronous control[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(4): 162-167.
- [11] 张英敏,吴谨轶,江琴,等. 基于风储联合系统的受端电网黑启动技术及协调恢复策略[J]. 工程科学与技术,2023,55(2):72-83.
ZHANG Yingmin, WU Jinyi, JIANG Qin, et al. Receiving-end power grid black start technology and coordinated restoration strategy based on wind-storage combined system[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(2): 72-83.
- [12] 杨帆. 具有同步发电机接口特性的微网逆变器并联控制策略研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.
YANG Fan. Research on parallel control strategy of microgrid inverter with synchronous generator interface characteristics [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.

收稿日期:2022-10-13

修改稿日期:2022-11-30