

储能系统黑启动功率分配控制策略

厉成元¹,张超¹,李哲¹,刘博畅¹,高靖¹,金鹏飞²

(1.天津电气科学研究院有限公司,天津 300180;

2.永青集团有限公司,浙江 温州 325000)

摘要:孤岛电网由于电网容量小、调节能量弱,极易发生系统性崩网。当孤岛电网崩溃后,需要在不依赖外部公共电网的情况下,通过其内部的黑启动电源进行电网的建立。近年来,随着储能技术的快速发展,越来越多的储能系统应用于孤岛电网中,用于孤岛电网内电力负荷平衡的调节,这使得储能系统与传统的柴油发电机共同来完成电网黑启动成为可能。以实际孤网黑启动为例,介绍了孤网黑启动电源供电网络架构,同时针对储能变流器多机电压源并联运行情况,在解决多机并联系统内部环流的前提下,分析了大规模储能系统作为黑启动电源所采用的基于虚拟阻抗的统一下垂控制策略,构建了仿真模型,并进行了验证。

关键词:孤网;储能;柴油发电机;黑启动;下垂控制;虚拟阻抗;功率均分策略

中图分类号:TM61 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23712

Power Distribution Control Strategy of Energy Storage System in Black Start Process

LI Chengyuan¹,ZHANG Chao¹,LI Zhe¹,LIU Bochang¹,GAO Jing¹,JIN Pengfei²

(1. Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China;

2. Yongqing Group Co., Ltd., Wenzhou 325000, Zhejiang, China)

Abstract: Due to the small capacity and weak regulation energy of island grid, it is very easy to cause system collapse. When the isolated grid collapses, it is necessary to establish the grid through its internal black start power supply without relying on the external public grid. In recent years, with the rapid development of energy storage technology, more and more energy storage systems are incorporated into the isolated grid to regulate the power load balance in the isolated grid, which makes it possible for the energy storage system and the traditional diesel generator to complete the black start of the power grid together. Take the actual isolated grid black start as an example, the power supply network architecture of isolated grid black start power supply was introduced, and the unified droop control strategy based on virtual impedance for building large-scale energy storage system black start power supply in isolated mode was analyzed under the premise of solving the internal circulation of multi machine parallel system and aiming at the parallel voltage source of energy storage converter, the simulation model was constructed and verified.

Key words: isolated grid; energy storage; diesel generator; black start; droop control; virtual impedance; power sharing strategy

随着我国一带一路政策的持续推进,中国企业去海外投资建厂越来越多。然而,由于一带一路国家的电力供应基础设施普遍比较薄弱,电力供应无法保障,为满足大工业的生产用电,工矿企业普遍建设了独立的火力发电厂。而这类孤岛电网普遍具有电网容量小,网内生产负荷波动剧烈,电网运行稳定性差的特点,无法保障大功

率生产负荷可靠用电。同时,在这类电网中,为减少化石能源的消耗,提高生产经济性,往往存在一定比例的新能源发电电源。如何保障电力负荷平衡,且在电网发生系统性崩网后,如何快速成功实现孤网黑启动,一直是此类电网运行最大的痛点。

储能技术作为构建新一代电网的关键核心

基金项目:天津电气科学研究院有限公司创新基金项目:1 500 V DC大功率三电平储能变流器关键技术研究及应用(YF2021ZL001)

作者简介:厉成元(1983—),男,硕士,高级工程师,Email:lichengyuan@tried.com.cn

技术之一,其在新能源消纳、平抑波动、电网调峰调频、火电辅助调频、虚拟电厂等方面将发挥积极的作用。大规模储能集群控制系统以其灵活的布置、智能的充放电控制,在解决电力负荷平衡、保安电源、黑启动电源等方面发挥着不可替代的作用。文献[1]论述了柴油发电机作为单一黑启动电源进行矿山孤网黑启动方法,该方法为目前传统的孤岛电网启动方法,需要借助多台柴油发电机并列运行作为电厂厂用电提供负荷。在实际操作过程中容易出现柴油发电机并列运行失败、电网稳定性弱导致黑启动失败的情况。文献[2]分析了微电网中各类微电源黑启动能力、参考源的选取及黑启动过程中微电源控制方式。文献[3]研究了储能系统作为火电厂黑启动电源的控制策略,提出多个储能变流器(power converter system, PCS)并联运行的下垂控制策略,通过虚拟阻抗环节,保证了功率均分与电池荷电状态(state of charge, SOC)的均衡,采用软启升压方式建立多变流器并联的储能系统离网电源。文献[4]介绍了一种采用虚拟同步机方式在孤网中多台储能变流器并列运行及多变流器之间的同期控制技术。

本文以PCS多机并联运行系统与柴油发电机并列运行控制策略为研究对象,着手解决两种不同特性的电压源之间功率平滑过渡问题,提出一种基于虚拟阻抗的统一下垂控制的功率分配策略。储能系统经高厂变升压之后为黑启动负载供电,在电力不足时,柴油发电机组启动,并联到PCS升压后的母线上,共同为负载供电。通过负荷分配策略,将PCS承担的大部分负载逐步转移到柴油发电机组上,再控制储能变流器退出,柴油发电机组独立进行微电网黑启动负荷供电。

1 孤网黑启动

1.1 孤网黑启动供电网络架构分析

孤网黑启动指整个系统不依赖公共电网的帮助,通过系统中具有自启动能力的机组的启动,带动无自启动能力的机组,逐步扩大电力系统的恢复范围,最终实现整个电力系统的启动或恢复,即通过黑启动电源逐步启动全网所有设备。孤网黑启动一般在电力系统首次启动或者整个电力系统因故障停运后进行。

具备储能系统的孤网黑启动供电网络架构

如图1所示。在孤网电网正常运行时,储能系统通过降压变接入150 kV的主电网,进行电网的调峰调频。当电网失电后,孤岛电网需要黑启动时,储能系统通过联络变,与柴发10 kV交流母线连接,接入黑启动电网。黑启动电源供电回路如图1中虚线所示。

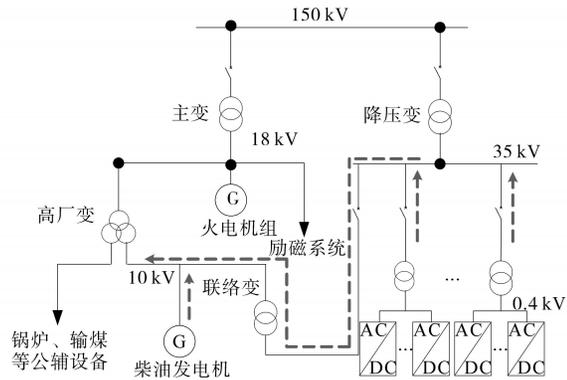


图1 孤网黑启动电网架构

Fig1 Isolated grid black start grid architecture

1.2 孤网黑启动电源特性介绍

在孤网的黑启动过程中,由于孤网一定是脱离大电网运行在孤岛模式下的,因此在分层控制的微电网中需要一个主参考源来提供系统的参考电压及频率。文献[5]总结了主参考源应具备的特征,其中最重要的有:能快速实现自身的黑启动;能够提供稳定的电压及频率;能快速跟踪负荷变化以免产生大幅波动。考虑到微型燃气轮机、燃料电池及柴油发电机良好的负荷跟随及抗扰动特性,它们无疑是孤网黑启动主参考源的最佳选择。故在传统的孤岛电网中,常选用柴油发电机作为黑启动电源的首选。

随着可再生发电技术的快速发展,电力电子技术应用更加成熟。理论上,在电力电子变换器的直流侧加装适当的储能设备,就能使该微电源具备黑启动能力。但是,考虑到黑启动微电源需要在一段时间内能独立、稳定带负荷运行,一些能源供给具有较大波动或受较多因素影响的P/Q源是不适合作为黑启动电源的,如光伏微电源、风力发电微电源;而电池储能系统,由于电力电子直流侧接入较为稳定的直流电压源,故在V/F运行模式下,可以为负荷提供稳定的电压和频率参考,是一种非常理想的黑启动电源^[5]。受限于直流侧储能电池的SOC,储能系统可以与柴发并联运行,共同提供黑启动电源,降低化石能源消耗,减少黑启动时间,提高黑启动成功率。

2 多变流器并联离网运行控制

2.1 多变流器并联控制

当前各类分布式电源的容量越来越大,由于开关器件等关键器件的限制,单台变流装置的容量有限,采用多变流器并联可以有效提高系统功率等级、系统效率和可靠性,已成为近年研究和应用的热点。本控制策略中储能系统为提升功率等级,采用直接并联方式,多机并联的各台变流器以电压源方式运行,并联系统拓扑结构如图2所示。

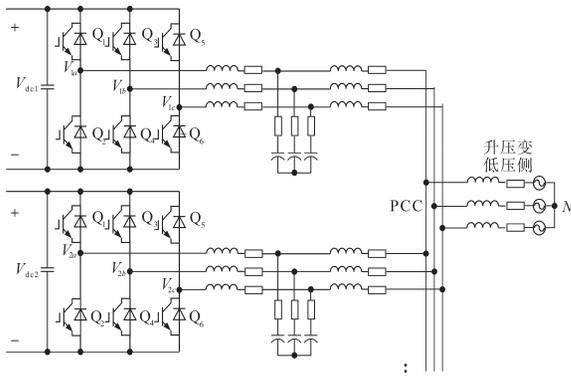


图2 多机并联系统拓扑结构

Fig.2 Topology of multi machine parallel system

图2中为多个LCL型变流器直接并联于电力变压器的低压侧。PCC点为多个变流器公共并网节点。

多变流器直接互联时,由于各变流器功率器件瞬时开关序列不一致、存在LCL滤波谐振点等原因,系统中除共同向外输出的电流以外,各变流器之间还存在差模环流,该环流与各变流器的瞬时开关状态(频谱分布)、滤波器与线路参数、电网容量等因素有关^[6]。在图2所示的开关状态下的等效电路如图3所示。

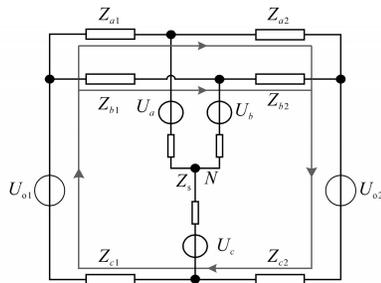


图3 并联变流器等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of parallel converter

图3中, U_{o1} 、 U_{o2} 分别为两台变流器瞬时输出电压; Z_a 、 Z_b 、 Z_c 为变流器各相等效阻抗; U_a 、 U_b 、 U_c 为三相电网相电压; Z_s 为电网等效阻抗。

在仅考虑三相对称情况下,第 m 台和第 l 台变流器之间的差模环流如下式所示:

$$i_{ml} = i_{om} - i_{ol} = \left(U_{om} - \frac{\sum_{i=1}^n U_{oi} Y_{oi} + U_s Y_s}{\sum_{i=1}^n Y_{oi} + Y_s} \right) Y_{om} - \left(U_{ol} - \frac{\sum_{i=1}^n U_{oi} Y_{oi} + U_s Y_s}{\sum_{i=1}^n Y_{oi} + Y_s} \right) Y_{ol} \quad (1)$$

式中: i_{om} 、 i_{ol} 分别为第 m 、 l 台变流器输出电流; U_{oi} 为各变流器输出电压; U_s 为电网电压; Y_{oi} 为各变流器输出电纳(Y_{om} 和 Y_{ol} 为第 m 台和第 l 台变流器输出电纳); Y_s 为电网等效电纳; n 为并联变流器数量。

由于各变流器之间的差模环流主要存在于谐振点附近,低频及高频分量都较小,各变流器之间的差模谐振环流取决于各变流器输出电压谐振频率分量之差^[7]。此时,导纳 Y 近似为无穷大,远大于 Y_s ,环流仅存在于各变流器之间,并不流入电网(Y 为各台变流器谐振频率下输出电纳,假设各变流器输出导纳相等)。

为抑制多机并联系统中变流器之间的环流,采用载波同步方式,实现多变流器并联运行。多机系统同步线连接方式如图4所示。

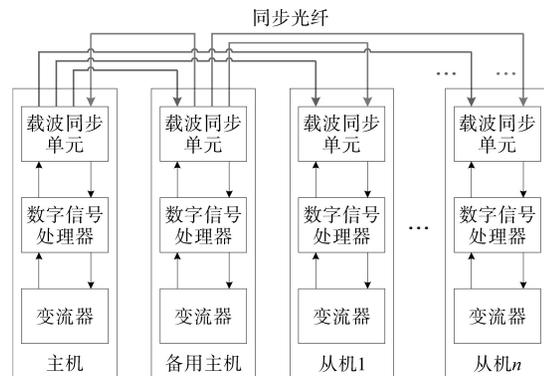


图4 多机并联载波同步线连接方式

Fig.4 Connection mode of multi machine parallel carrier synchronous line

图4中,每台变流器包括载波同步单元、数字信号处理器、变流器主电路三个组成部分,载波同步由各台设备之间的载波同步单元通过同步光纤连接实现。主机通过 $n+1$ 条同步线分别连接至备用主机和 n 台从机,备用主机通过 $n+1$ 条同步线分别连至主机和 n 台从机,各从机通过2条同步线分别与主机和备用主机相连,各从机之间无直接连接。

2.2 改进的统一下垂控制

在多变流器并联系统中,变流器之间功率均分精度是体现系统性能优劣的重要指标之一。在实际并联系统中,线路中阻抗空间分布的随机

虽然可以使并联变流器系统接收统一下垂指令,但单机功率均分精度与输出电压跌落是一对固有矛盾。故由于下垂控制在低压微电网中应用仍存在一定的不足和缺陷,为解决下垂控制的问题,研究学者提出了虚拟阻抗方法^[9-10]。

本控制策略中通过采样获得变流器输出电流,并与虚拟阻抗相乘计算出电压降,然后根据下垂控制策略得到电压参考值,并从电压参考值中减去上述电压降,产生新的参考电压,以达到模拟实际阻抗的作用,即实现线路阻抗重塑。基于虚拟阻抗的统一下垂控制结构如图7所示。其中 k_n 为各变流器的虚拟阻抗。

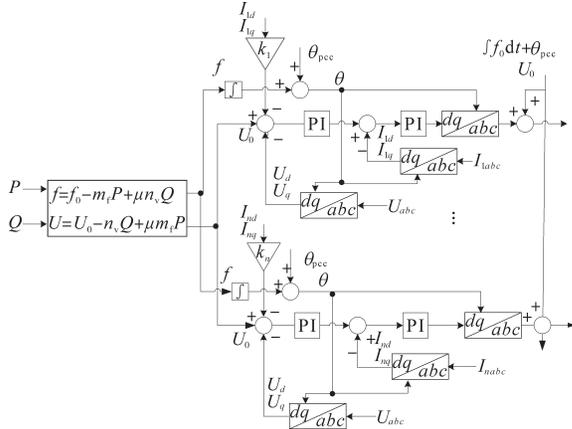


图7 基于虚拟阻抗的统一下垂控制结构

Fig.7 Unified droop control structure based on virtual impedance

3 储能黑启动功率控制策略

本控制策略主要针对并联变流器储能系统应用于海岛、矿区等孤岛电力系统的黑启动过程,储能系统首先采用零起升压方式,建立起离网电网,这一阶段由储能系统单独为重要负载提供黑启动电源,在储能系统荷电量不足的情况下,供电系统转到第二阶段,该阶段由柴油发电机组做为独立的黑启动电源供电,同时储能系统退出供电过程。

为了减小黑启动负荷从储能系统独立供电转移到柴油发电机组独立供电过程中对电网的冲击,设计了多机并联储能系统基于虚拟阻抗的平滑过渡控制策略,在实现了大部分负荷在储能系统和柴油发电机组的逐步过渡后,再退出储能系统,而不是全部负荷在两个电源间的瞬间切换,从而有效避免了两个黑启动电源切换过程中对于电网的冲击,实现负荷的平滑转移。

黑启动电源供电系统模型如图8所示。

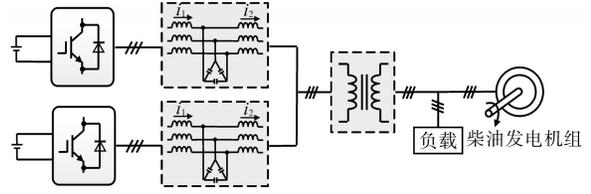


图8 黑启动电源供电系统模型图

Fig.8 Model diagram of black start power supply system

本文提出的黑启动功率分配控制策略中,储能变流器进行电压控制,采用比例积分控制器(PI),在统一下垂控制的基础上增加了可调节的虚拟阻抗,用以控制黑启动过程中储能变流器输出的功率逐步减小,实现大部分负荷从储能变流器平滑过渡到柴油发电机组。

4 仿真验证

为验证本控制策略的有效性,结合实际工程系统参数,在Simulink平台搭建了仿真模型。仿真模型由两台500 kV·A储能变流器和一个模拟柴油发电机组的电压源组成,两台储能变流器并联运行,经变压器升压之后为负载供电,之后控制柴油发电机组启动,并联到储能变流器升压后的母线上,共同为负载供电。仿真控制虚拟阻抗使储能变流器承担的大部分负载逐步转移到柴油发电机组上,再使储能变流器退出,以此来减小对电网的冲击,之后柴油发电机组独立作为黑启动电源为负载供电。

系统仿真参数设置如表1所示。

表1 黑启动功率分配仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of black start power allocation

| 仿真参数 | | 数值 |
|-------|--------|--------------|
| 变流器参数 | 额定容量 | 500 kV·A |
| | 开关频率 | 3.2 kHz |
| | 直流母线电压 | 750 V |
| | 交流端口电压 | 380 V |
| | 网侧电感 | 35 μH |
| | 机侧电感 | 150 μH |
| 电力升压变 | 滤波电容 | 66 μF(三角形接法) |
| | 连接组别 | Dy11 |
| | 额定容量 | 3 150 kV·A |
| 柴发模拟源 | 原副边电压 | 10 kV/380 V |
| | 电压 | 10 kV |
| 黑启动负荷 | 类型 | swing |
| | 有功功率 | 780 kW |
| | 无功功率 | 190 kvar |

在黑启动的初始阶段,储能系统以孤岛形式运行,承担全部负载。在0.2 s时刻,柴油发电机组电压建立起来,通过同期并网开关与储能电源并

列运行。因为柴油发电机组采用电压源模拟,为了更好地模拟初始接入时的功率分配关系,利用电力系统有功、无功流动方向与电压幅值、相角关系,对电压源的电压幅值和相角进行了优化,故在0.2 s时负载功率总体负荷有略微增大。在储能系统与柴油发电网并列运行之后,柴油发电机承担小部分负载功率,储能系统承担大部分负载功率。为了将储能系统承担的负载转移到柴油发电机组,并对柴油发电机组产生较小的冲击。0.6 s时开始,在控制环路中使虚拟阻抗 k 逐渐增大,储能系统输出功率逐渐减小,柴油发电机组输出功率逐渐增大,最终实现了负荷在储能系统和柴油发电机组之间的平稳转移。此时控制储能变流器退出,相较于直接退出储能变流器可大大降低负荷对柴发电网的冲击。

图9、图10分别为储能变流器1、变流器2功率变化仿真结果图。

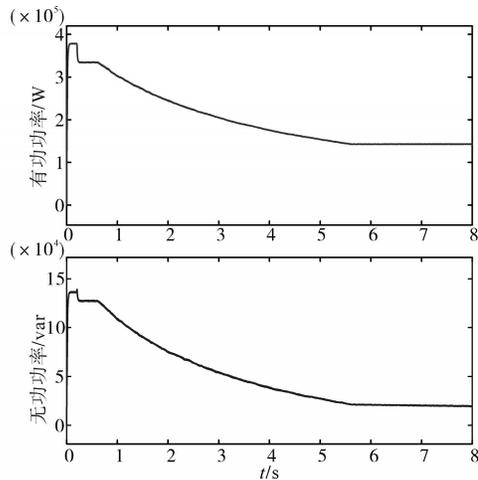


图9 储能变流器1功率变化

Fig.9 Power change of energy storage converter 1

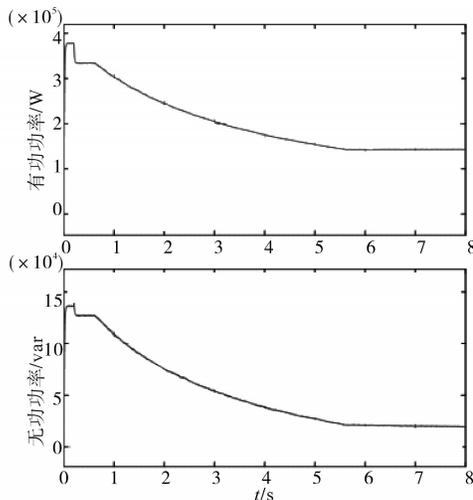


图10 储能变流器2功率变化

Fig.10 Power change of energy storage converter 2

本系统策略采用基于虚拟阻抗的统一下垂控制,由图9~图10可见,在虚拟阻抗的实时调节过程中,实现了两台储能变流器的功率精确均分。该控制策略可在实际应用中,有效保障储能变流器充放电过程中直流侧电池荷电量的平衡。

柴油发电模拟源在0.2 s时,经过同期并入储能系统建立的黑启动供电电网,两个电源并列运行,此时储能系统承担大部分负荷。随着虚拟阻抗的调节,在大约5.5 s时,储能系统承担的负载功率从大约80%下降到约30%,柴油发电机组承担功率从大约20%增加到约70%。图11为储能系统负载功率变化仿真结果图,图12为柴油发电模拟源功率变化情况仿真结果图。

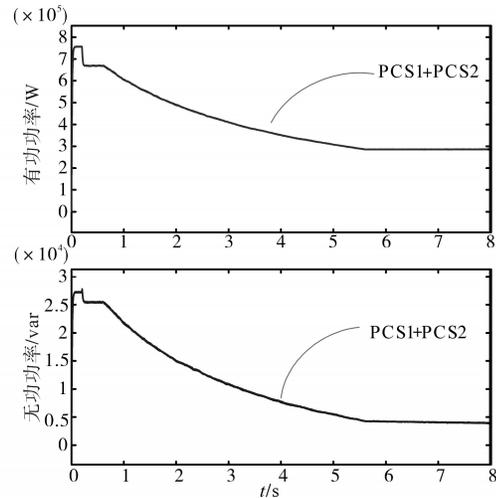


图11 储能系统负载功率变化情况

Fig.11 Load power variation of energy storage system

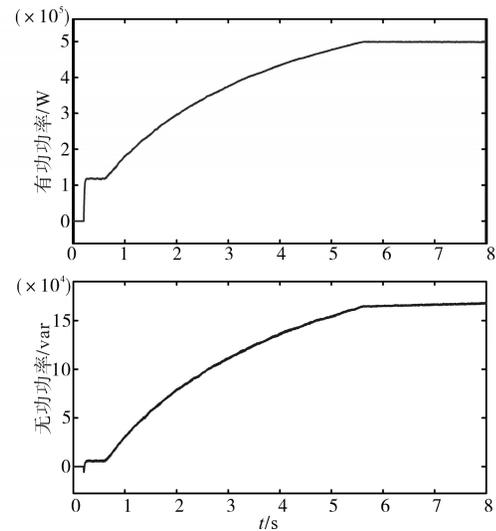


图12 柴油发电模拟源负载功率变化情况

Fig.12 Load power variation of diesel generation simulation source

在储能系统和柴发模拟源功率分配的过程中,并网公共节点的稳态电压、电流一直保持平滑稳定,如图13所示。负载接入点的稳态电压、

电流亦未出现波动,负载功率保持稳定,如图14、图15所示。

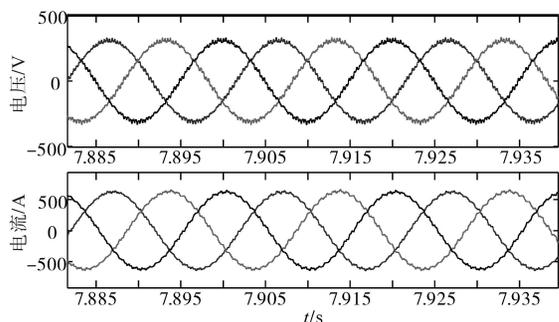


图13 并网公共点稳态电压和电流波形

Fig.13 Steady state voltage and current waveforms of grid connected common point

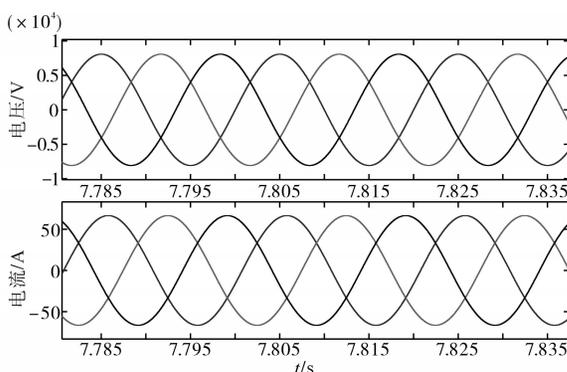


图14 负载稳态电压和电流波形

Fig.14 Steady state voltage and current waveforms of load

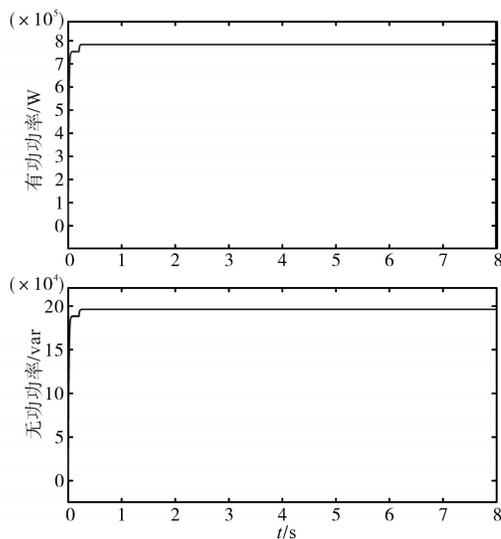


图15 负载功率变化情况

Fig.15 Load power variation

5 结论

首先介绍实际工程的孤网黑启动电网架构及黑启动电源特性。在此基础上结合储能变流器电压源多机并联控制,采用了载波同步技术,解决系统的同步问题,同时进一步分析了下垂控

制原理,并对传统下垂控制进行了改进,结合系统并联和功率分配特点,提出统一下垂控制策略。针对在孤网中电网阻抗对于下垂控制的不利影响,在统一下垂控制结构基础上,叠加了可调节的虚拟阻抗机制,来实现多变流器电压源在低压孤网并联运行时的功率均分及平滑控制策略,最后通过建模进行了仿真验证。所提出的控制策略不仅可以做到在孤网中多变流器系统的功率精确均分,还可以在实际孤网黑启动中与传统的柴油发电机并列运行,共同作为黑启动电源,降低化石能源消耗,提高孤网黑启动成功率,具有非常高的实际工程应用价值。

参考文献

- [1] 王金生,李小双,负二伟,等. 矿山孤网黑启动及机网协调[J]. 中国金属通报, 2020, 11: 74-75.
Wang Jinsheng, Li Xiaoshuang, Yun Erwei, *et al.* Mine isolated network black start and machine network coordination[J]. China Metal Bulletin, 2020, 11: 74-75.
- [2] 孟强,牟龙华,许旭锋,等. 孤立微电网的黑启动策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 59-64.
Meng Qiang, Mou Longhua, Xu Xufeng, *et al.* Black start strategy of isolated microgrid[J]. Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 59-64.
- [3] 王皓靖,徐少华,张宇,等. 电池储能系统作为火电厂黑启动电源的控制策略[J]. 电器与能效管理技术, 2017, (19): 65-71.
Wang Haojing, Xu Shaohua, Zhang Yu, *et al.* Control strategy of battery energy storage system as black start power in thermal power plant[J]. Electrical Appliances and Energy Efficiency Management Technology, 2017, (19): 65-71.
- [4] 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.* Island start and synchronization control technology of 5 MW energy storage virtual synchronous generator[J]. Electric Drive, 2019, 49(5): 73-78.
- [5] 毕锐,吴建锋,丁明,等. 孤立微网多元储能与柴油发电机协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 73-79.
Bi Rui, Wu Jianfeng, Ding Ming, *et al.* Coordinated control strategy of isolated microgrid multiple energy storage and diesel generator[J]. Power System Automation, 2014, 38(17): 73-79.
- [6] He Jinwei, Liang Beihua, Li Yunwei, *et al.* Simultaneous microgrid voltage and current harmonics compensation using coordinated control of dual-interfacing converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 2647-2660.
- [7] He Jinwei, Liu Xiaohui, Lei Ming, *et al.* A broad frequency range harmonic reduction for cascaded-power-cell-based islanded microgrid with lumped PCC filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9251-9266.

(下转第80页)

Shuai Haiyan, Zou Bichang. Research on virtual flux estimation predictive control of back-to-back power converter[J]. *Electric Drive*, 2018, 48(12):28-34.

[5] 杨新华, 王志强, 黄玉珍, 等. 降低直流磁铁电源纹波用有源滤波器研究[J]. *电气传动*, 2018, 48(7):87-91.

Yang Xinhua, Wang Zhiqiang, Huang Yuzhen, *et al.* Research on active filter for reducing DC magnet power ripple[J]. *Electric Drive*, 2018, 48(7):87-91.

[6] 颜晟, 苏广宁, 张沛超, 等. 基于故障录波时序信息的电网故障诊断[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(17): 114-119.

Yan Sheng, Su Guangning, Zhang Peichao, *et al.* Fault diagnosis of power grid based on fault recorder sequential information[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(17): 114-119.

[7] 黄建, 胡晓光, 巩玉楠, 等. 高压断路器机械故障诊断专家系统设计[J]. *电机与控制学报*, 2011, 15(10): 43-49.

Huang Jian, Hu Xiaoguang, Gong Yunan, *et al.* Machinery fault diagnosis expert system for high voltage circuit breaker[J]. *Electric Machines and Control*, 2011, 15(10): 43-49.

[8] 牛胜锁, 梁志瑞, 张建华, 等. 基于三谱线插值FFT的电力谐波分析算法[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(16): 130-136.

Niu Shengsuo, Liang Zhirui, Zhang Jianhua, *et al.* An algorithm for electrical harmonic analysis based on triple-spectrum-line interpolation FFT[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(16): 130-136.

[9] 邸彩芸, 赵志, 李明星, 等. 一种基于T型三电平APF的优化无差拍控制[J]. *电气传动*, 2020, 50(10):63-66.

Di Caiyun, Zhao Zhi, Li Mingxing, *et al.* An optimized dead-beat control based on T-type three-level active power filters[J]. *Electric Drive*, 2020, 50(10):63-66.

[10] Wang Fei, Mi Zengqiang, Su Shi, *et al.* Short-term solar irradiance forecasting model based on artificial neural network using statistical feature parameters[J]. *Energies*, 2012, 5(5): 1355-1370.

[11] 秦斌, 张俊杰, 王欣, 等. 基于RBF网络的车载超级电容滑模控制系统[J]. *电气传动*, 2018, 48(8):65-69.

Qin Bin, Zhang Junjie, Wang Xin, *et al.* Sliding mode control system of vehicle supercapacitor based on RBF neural-network[J]. *Electric Drive*, 2018, 48(8):65-69.

[12] Kebriaei H, Araabi B N, Rahimi-Kian A. Shortterm load forecasting with a new nonsymmetric penalty function[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(4): 1817-1825.

[13] He Wuming, Wang Peiliang. Analog circuit fault diagnosis based on RBF neural network optimized by PSO algorithm[C]//2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. IEEE Computer society. 2010:628-631.

[14] 刘皓明, 朱芳芳, 钱程晨. 收网算法及其在低压配电网潮流优化中的应用[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(4): 43-48.

Liu Haoming, Zhu Fangfang, Qian Chengchen. Shrinking net algorithm and its application in power flow optimization of low-voltage distribution system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(4): 43-48.

[15] Chun Yang. FFT Acquisition of periodic, aperiodic, puncture and overlaid code sequences in GPS[C]//ION GPS 2001. Salt Lake City, UT, 2001: 11-14.

收稿日期:2021-04-20

修改稿日期:2021-05-16

(上接第37页)

[8] 陈杰, 刘名凹, 陈新, 等. 基于下垂控制的逆变器无线并联与环流抑制技术[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(7):73-78.

Chen Jie, Liu Mingao, Chen Xin, *et al.* Wireless parallel connection and circulating current suppression technology of inverter based on droop control[J]. *Journal of Electrotechnics*, 2018, 33(7):73-78.

[9] 刘靖宇, 于惠均, 龚星宇, 等. 基于虚拟阻抗的低压微电网功率均分控制策略[J]. *湖南工业大学学报*, 2021, 35(3):49-54.

Liu Jingyu, Yu Huijun, Gong Xingyu, *et al.* Power sharing control strategy of low voltage microgrid based on virtual impedance[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2021, 35(3):49-54.

[10] 周晨. 基于虚拟阻抗的微电网下垂控制策略及谐波抑制方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.

Zhou Chen. Research on sag control strategy and harmonic suppression method of microgrid based on virtual impedance[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

收稿日期:2021-06-30

修改稿日期:2021-12-14