

文章编号:1671-251X(2024)S1-0194-06

基于 PLC 通信的矿山应急微电网控制策略

韦钊¹, 杨大山^{2,3,4,5}, 梁林⁶

(1. 陕西能源职业技术学院 煤炭与化工产业学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013; 3. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013;
4. 煤矿应急避险技术装备工程研究中心, 北京 100013; 5. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013; 6. 陕西陕煤黄陵矿业有限公司 一号煤矿, 陕西 延安 727307)

摘要: 应急微电网在主电网停电情况下为关键设备提供后备电源, 对保障煤矿安全生产具有重要意义。在现有的配电设施基础上设计了一种交流微电网系统架构, 为保障在 1 个或多个分布式发电机(DG)发生故障或输出功率不足情况下电网供电的可靠性, 提出了一种基于固定频率电力线载波通信(PLC)的孤岛微电网控制策略, 实现在 DG 之间提供自动和公平的负载共享, 从而显著增加微电网供电的灵活性和可靠性。分布式微电网所有 DG 和电池存储系统(BSS)均通过逆变器连接到公共交流母线, 所有负载在公共点处连接。除了电池充电外, 所有 DG 电流为单向电流。PLC 采用高频信号进行通信, 该信号通过与电源电流相同的介质(电力线)传输。分析了 PLC 的注入、检测和抑制方法, 以及总体通信逻辑。仿真结果验证了基于 PLC 的 DG 功率动态调整策略的有效性。

关键词: 煤矿配电; 交流微电网; 应急供电; 控制策略; 电力线通信

中图分类号: TD60 文献标志码: A

Control strategy for mine emergency microgrid based on PLC communication

WEI Zhao¹, YANG Dashan^{2,3,4,5}, LIANG Lin⁶

(1. College of Coal and Chemical Industry, Shaanxi Energy Institute, Xianyang 712000, China;
2. CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China; 4. Engineering Research Center for Technology Equipment of Emergency Refuge in Coal Mine, Beijing 100013, China;
5. Beijing Engineering and Research Center of Mine Safe, Beijing 100013, China;
6. No.1 Coal Mine, Shaanxi Shanmei Huangling Mining Co., Ltd., Yan'an 727307, China)

0 引言

煤矿井下应急微电网实现在主电网电力短缺或停电的情况下为关键设备(提升机、通风机和排水泵等)提供电源, 从而保障关键设备运行工作正常^[1-2]。应急微电网包括分布式发电机(Distributed Generation, DG)和电池存储系统(Battery Storage System, BSS), 其可以在现有的配电基础设施上构建, 具有结构简单、稳定性高和电能质量好等优点^[3-4]。

对于应急微电网来说, 如果 1 个或多个 DG 发

生故障或输出功率不足, 如何保障负载的可靠供电是一个重要课题^[5-6]。本文提出了一种基于电力线载波通信(PLC)的孤岛微电网控制策略, 实现负载电流由电网 DG 共享, 实现 DG 输出功率的动态重新分配, 从而达到保障应急微电网供电安全的目的。

由于煤矿井下空间狭窄, 变频器及大型采掘设备的应用, 致使井下电网谐波干扰比较严重^[7-8]。PLC 信号幅值容易受到谐波干扰, 造成信号失真, 但通信频率受影响不大, 因此本文设计 PLC 通信采用固定频率的方式, 从而减少谐波污染, 提高通信质量。

收稿日期: 2024-01-25; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 陕西能源职业技术学院科研计划项目(20BJ1; 19KYP01); 陕西能源职业技术学院煤矿智能与绿色开采科研创新团队资助项目(2021KYTD01)。

作者简介: 韦钊(1987-), 男, 山东临沂人, 讲师, 博士, 研究方向为煤矿信息化, E-mail: 25328482@qq.com。

1 分布式微电网结构设计

分布式微电网结构如图 1 所示,所有 DG 和 BSS 都通过逆变器连接到公共交流母线,所有负载在公共点 v_L 处连接^[9-10]。除了电池充电(此处不考虑)外,所有 DG 电流为单向电流(从左到右)。逆变器参量:在连接点处的母线电压 v_{Sn} ($n=1,2,\cdots,N$),以及在连接点右边紧接的下游电流的 i_n 。

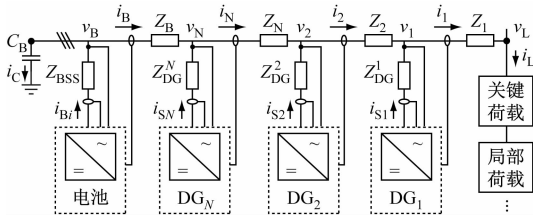


图 1 分布式微电网结构

微电网电流控制如图 2 所示。设 C_n 为增益为 1 的 PI 控制器,则各 DG 逆变器的传递函数为

$$\frac{i_{Sn}}{i_n} = \frac{D_n}{1 + (L_n/K_n)s} \tag{1}$$

式中: i_{Sn} 为 DG $_n$ 提供的电流; D_n 为逆变器 n 相对于其下游负载的比例; L_n 为逆变器 n 的输出电感; K_n 为控制增益; $s=R_n/L_n$, R_n 为逆变器 n 的输出电阻。

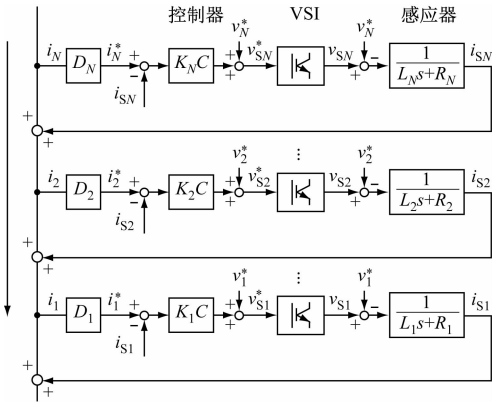


图 2 微电网电流控制

如果逆变器 n 输出功率在总负载中的比例由 E_n 给出,则 E_n 和 D_n 之间的对比关系可以从下式中看出。

$$\begin{cases} E_n = \frac{S_n}{\sum_{k=1}^N S_k} \\ D_n = \frac{S_n}{\sum_{k=n}^N S_k} \end{cases} \tag{2}$$

式中 S_n 为 DG $_n$ 的额定功率。

图 2 中 DG 逆变器的电流控制耦合到了公共电流上,通过选择特定的控制增益 K_n ,可以实现 DG

逆变器电流控制的解耦^[11-12]。此外,每个 DG 逆变器复制其下游邻居的动态响应,尽管按其比例 E_n 变化,仍导致所有 DG 逆变器表现出相同的动态。因此,所有 DG 逆变器的总电流为

$$i_{DG} = \sum_{n=1}^N i_{Sn} = \sum_{n=1}^N E_n i_L \frac{1}{1+s} \tag{3}$$

式中 i_L 为负载电流。

需要注意的是,从 PLC 实现的角度出发,DG 逆变器进行上游电流测量比下游电流测量更方便,如图 3 所示。因此 PLC 信号可由上游的 DG $_n$ 接收,然后在下游去除。注意到 $i_n = i_{n+1} + i_{Sn}$ 导致如图 4 所示的电流控制,该电流由 i_{n+1} 的上游电流驱动。

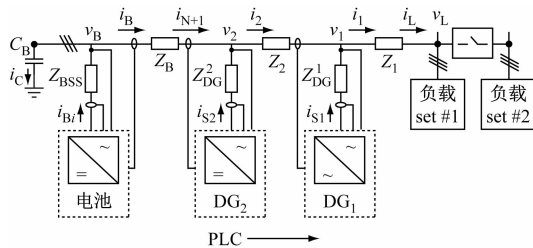


图 3 2 个 DG 组成的微电网结构

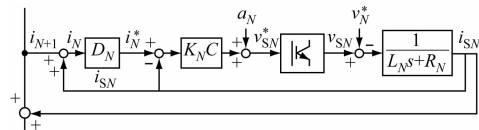


图 4 单个 DG 电流控制

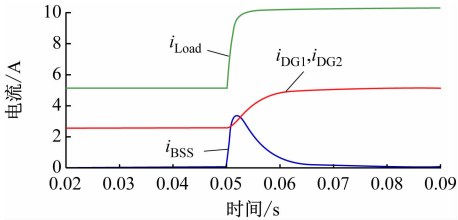
2 个 DG 组成的微电网在正常情况下的电流共享情况如图 5(a)、图 5(d)所示。本文使用的仿真参数见表 1。2 个相同的 DG 为负载提供相同比例的功率, $E_1=E_2=0.5$, $D_1=0.5$, $D_2=1$, 在 0.05 s 时,当发生负载阶跃变化,2 个 DG 同步变化到新的电流电平,此时 BSS 提供瞬态的高电流来补充电网的不足。

表 1 仿真参数

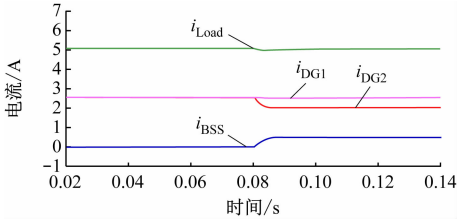
参数	值
负载阻抗	40 Ω /50 mH
Z_B	0.1 Ω /4 mH
Z_2	0.1 Ω /1 mH
Z_1	0.3 Ω /3 mH
Z_{BSS}	2 Ω /80 mH
Z_{DG}^1, Z_{DG}^2	1 Ω /50 mH
C_B /mF	0.1
电网电压/V	AC380
BSS, DGs 电压/V	580
BSS, DGs 频率/kHz	5

如果 DG $_1$ 发生故障,则 DG $_2$ 将自动尝试提供

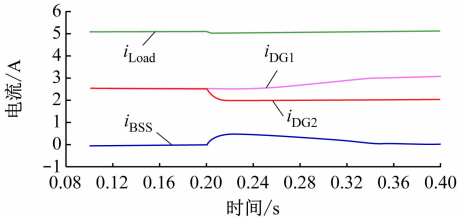
满载电流,因为 $D_2 = 1$ 。如果输出饱和,则 BSS 将自动提供负载电流的剩余部分。然而,如果 DG_2 发生故障,则 DG_1 不会注意到该故障,并将继续只提供一半的负载电流,因为 $D_1 = 0.5$ 。剩余的一半负载电流将由 BSS 提供,这样会导致不必要的高电池放电率,如图 5(b)、图 5(e)所示。



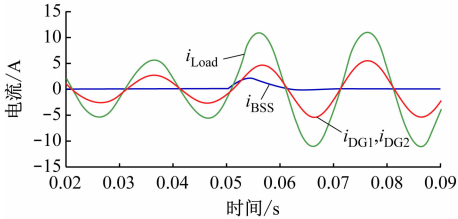
(a) 正常情况时 D 轴电流



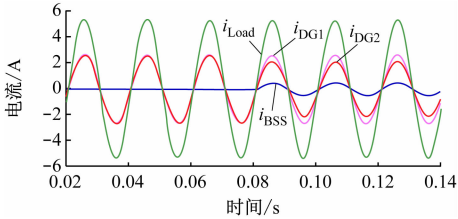
(b) DG_2 故障时 D 轴电流



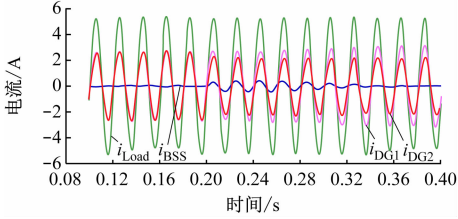
(c) 通过 PLC 控制后 D 轴电流



(d) 正常情况时 A 相电流



(e) DG_2 故障时 A 相电流



(f) 通过 PLC 控制后 A 相电流

图 5 DG_1 , DG_2 和 BSS 在不同场景下的仿真结果

针对该问题,提出了一种通过 PLC 通信来实现 DG 输出功率调整的方法,在其中 1 个 DG 发生故障或功率减少后,实现其他 DG 输出功率的自动调整,从而满足负载功率需求。

2 PLC 通信控制方法

设计 PLC 采用高频信号来进行通信,该信号通过与电源电流相同的介质(电力线)传输^[13-14]。本文提出了在同一频率下的相邻 PLC 通信控制策略,通信逻辑是上游逆变器 DG_{n+1} 通知下游邻居 DG_n 其单位负载信息,单位负载信息表达式为

$$L_{n+1} = \frac{P_{n+1}}{P_{\max, n+1}} \quad (4)$$

式中: P_{n+1} 为 DG_{n+1} 的实际输出功率; $P_{\max, n+1}$ 为 DG_{n+1} 的最大输出功率,即额定输出功率。

在给定的持续时间内,信息以 PLC 信号的形式传递,然后周期性地重复。在给定时间周期 T_s 内,用 PLC 信号的占空比来代表单位负载信息 L_{n+1} 。下游逆变器接收此信号,计算出上级 DG 的负载信息,并将其从电流中移除,注入自己的 PLC 信号供下一个下游 DG 接收。

单位负载 L_{n+1} 的信息可通过以下方式使用:逆变器 DG_n 通过积分回路(图 6)实现自身的负载 L_n 与其邻居的相平衡,上游邻居和其负载差异驱动积分器工作,从而实现 D_n 的改变。

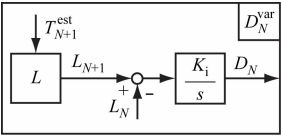


图 6 负载均衡积分器

从信号处理的角度来看,PLC 通信控制包括 PLC 注入、PLC 检测和 PLC 抑制^[15-16]。

2.1 PLC 信号注入

PLC 信号注入是通过在逆变器 DG_n 的输出电压 v_n^* 上加入频率为 ω_{PLC} 的谐波信号来实现的,下游逆变器 DG_{n-1} 将会检测到这个电流分量。注入信号表示为 a_n ,则

$$v_n^* = v_{n,cc}^* + a_n = v_{n,cc}^* + A \sin(\omega_{\text{PLC}} t) \quad (5)$$

式中: A 为 PLC 信号电压幅值; $v_{n,cc}^*$ 为逆变器电流控制的参考电压(不含 PLC)。

PLC 信号注入如图 7(a)、7(d)所示,其中 PLC 频率为 800 Hz, PLC 的幅度 A 被设置得足够高,以便在时域图中可见。

在微电网中, BSS 逆变器起电压控制作用,使 DG 逆变器并入交流母线的电压具有恒定的幅值和

频率。因此,BSS 逆变器电压控制被设计成比 DG 逆变器电流控制具有更高的带宽。

在 PLC 信号注入场景下,BSS 逆变器会对 PLC 信号注入做出反应,其目的是保持恒定的交流母线电压和频率^[17-18]。在此过程中,将产生与 PLC 电流相同大小和相位相反的谐波电流,这在图 7(a)、图 7(d)中可清楚看到。由于 BSS 逆变器的补偿作

用,源于 DG₂ 的 PLC 信号没有达到预期的效果。

为了防止这种情况发生,BSS 电流和电压测量加入数字陷波滤波器,使其对注入的 PLC 信号不可见。在 BSS 测量中使用陷波滤波器的效果如图 7(b)、图 7(e)所示,从 DG₂ 发出的 PLC 信号可到达 DG₁,DG₁ 能够检测到并提取有用的信息。

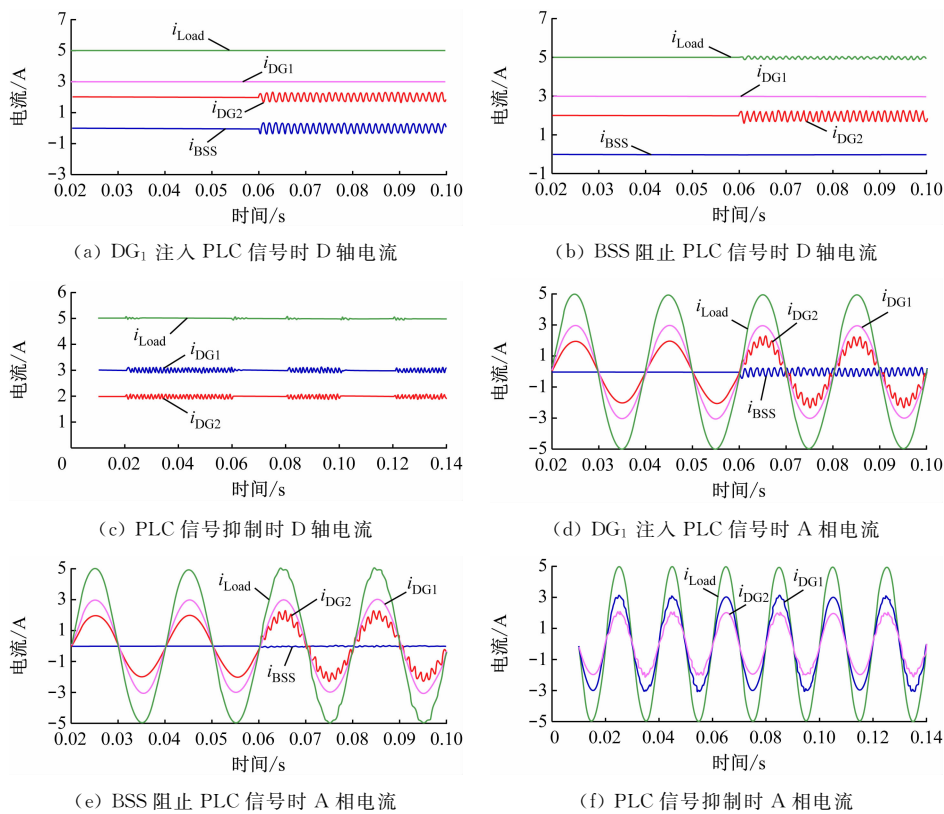


图 7 采用 PLC 控制策略后的仿真结果

2.2 PLC 信号检测

PLC 信号从上游的 DG 传递到下游的邻居,由于频率是固定的,下游的 DG 将会较容易地实现信号检测。设计采用以 ω_{PLC} 为中心频率的窄带通滤波器实现信号检测,并将信号的幅值和阈值进行比较,从而实现干扰信号的过滤。

2.3 PLC 信号抑制

在微电网中所有的 DG 使用相同的 PLC 频率,这样减少了微电网的谐波污染^[19],使负载端的 PLC 信号易于过滤,然而这也给 PLC 的实现带来了挑战。每个 DG 逆变器需要从电流中有效地去除检测到的 PLC 信号,以便以相同频率重新注入自己的 PLC 信号。

1) 前馈方案。PLC 信号抑制的前馈方案如图 4 所示,注入频率为 ω_{PLC} 的信号,使 DG_n 逆变器输出的电流 $i_{\text{Sn}}^{\text{PLC}}$ 与从上游接收的 i_{n+1}^{PLC} 的 PLC 信号完全相反^[20]。然后,在下游电流中,由于 $i_{\text{Sn}}^{\text{PLC}} + i_{n+1}^{\text{PLC}} =$

0,上游 PLC 信号将被完全抑制。

由图 4 的闭环控制可得到 DG_n 逆变器输出电流的表达式为

$$i_{\text{Sn}} = \left(\frac{1}{a_n s + 1} \right) \left[\frac{a_n}{R_n} a_n s / (\beta_n s + 1) + D_n i_{n+1} \right] \quad (6)$$

式中: $a_n = L_n / K_n$; $\beta_n = L_n / R_n$ 。

为补偿上游的电流 i_{n+1} ,则

$$\frac{a_n}{R_n} a_n s / (\beta_n s + 1) + D_n i_{n+1} = 0 \quad (7)$$

可确定所需的信号为

$$a_n = \frac{-R_n D_n \beta_n s + 1}{s} i_{n+1} \quad (8)$$

根据式(8),PLC 信号可实现抑制,但其对于系统参数 a_n , β_n 和 R_n , i_{n+1}^{PLC} 幅值的估计质量,以及 i_{n+1}^{PLC} 与补偿电流精确的相位匹配等方面的准确性依赖过重,大大降低了其应用效果。

2) 反馈方案。针对上述前馈方案的局限性,提出了一种 PLC 信号抑制的反馈方案,如图 8 所示,

在 DG_n 逆变器输出与注入点 a_n 之间增加增益 K_h 的反馈回路。

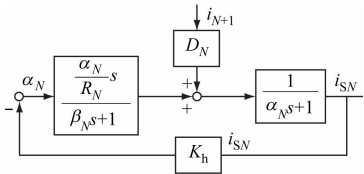


图 8 高频信号反馈补偿

从图 8 可得

$$i_{Sn} = \frac{D_n(\beta_n s + 1)i_{n+1}}{(\beta_n s + 1)(\alpha_n s + 1) + \frac{\alpha_n}{R_n}K_h s} \tag{9}$$

如果反馈电流比较大,则

$$i_{Sn} \approx \frac{D_n(\beta_n s + 1)}{1 + \frac{\alpha_n}{R_n}K_h s} i_{n+1} = \frac{D_n(\beta_n s + 1)}{1 + \gamma_n s} i_{n+1} \tag{10}$$

式中 $\gamma_n = \frac{\alpha_n}{R_n}K_h$ 。

i_{n+1} 与 i_{Sn} 之间传递函数的波德图如图 9 所示, 由于该传递函数也影响主电流控制回路, 因此重要的是保证其不会改变工频(50 Hz)的电流。从图 9 可看出, 在低频时, 传递函数可简单地表示为 D_n ; 高于 $1/\beta_n$ 的 PLC 频率信号得到了抑制。

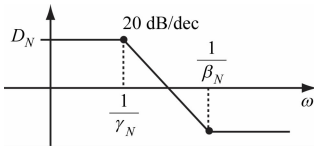


图 9 反馈增益的波德图

包含 PLC 抑制的 DG 电流控制如图 10 所示, 图中 F 块表示频率为 ω_{PLC} 的带通滤波器。PLC 信号抑制的仿真结果如图 7(c)、图 7(f)所示。PLC 抑制回路的输出如图 11 所示, 图中 DG_2 注入 PLC 的时间间隔为 0.02~0.06, 0.08~0.10, 0.12~0.14 s。在检测到 PLC 信号后, DG_1 成功地将其从下游电流中移除。抵消回路的时间常数约为 6 ms。

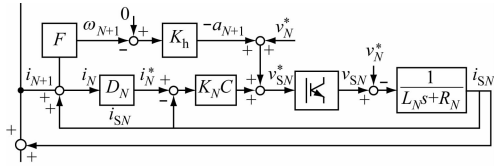


图 10 包含 PLC 抑制的 DG 电流控制

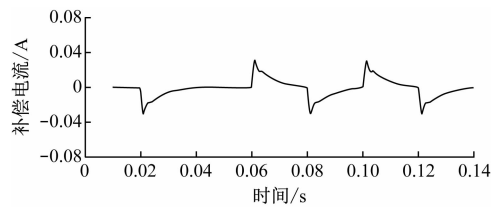


图 11 PLC 抑制回路响应曲线

3 基于 PLC 的 DG 功率动态调整

在 PLC 的机制下, 当某些微电网 DG 出现故障或功率变化时, 其余 DG 可调整其输出功率大小^[21]。仿真结果如图 5(c)、图 5(f)所示。 DG_1 的输出功率大小根据接收到的 PLC 信号进行调整, 如图 12 所示。

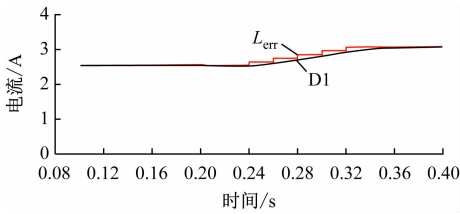


图 12 PLC 控制下 DG_1 对 DG_2 的输出减少进行补偿的结果

在图 5(c)、图 5(f)中, 最初 2 个 DG 平分负载电流, 均为 2.5 A, 0.2 s 时, DG_2 将输出降低到 2.0 A。这迫使 BSS 在负载电流中提供 0.5 A 的亏缺, 因此 $i_L = i_{DG1} + i_{DG2} + i_{BSS}$ 保持恒定。

采用 PLC 控制策略后, DG_2 负载信息通过 PLC 传送到下游, DG_1 一边进行全负载电流测量, 一边接收来自 DG_2 的 PLC 信号, 对自身功率进行适当调整, 如图 12 所示。由于 DG_1 最终产生 3.0 A 负载电流, 那么不再需要 BSS 参与负载平衡工作。

4 结语

为提高微电网对 DG 可能出现的故障和功率变化的容忍度, 提出了一种基于电力线通信(PLC)的孤岛微电网控制策略。由于设计系统 PLC 通信采用固定频率, 最大限度地减少了微电网的谐波污染。分析了 PLC 的注入、检测和抑制方法, 以及整个通信逻辑。研究表明, 通过使用一种有效的基于反馈的抑制方法, 可将 PLC 限制为仅邻对邻通信, 从而在整个微电网中使用单一 PLC 频率进行通信。通过仿真分析, 验证了理论的可行性。

参考文献:

[1] QIU Haifang, GU Wei, WANG Lu, et al. Trilayer stackelberg game approach for robustly power management in community grids [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(6): 4073-4083.

[2] SAEED M H, WANG Fangzong, KALWAR B A, et al. A review on microgrids' challenges & perspectives [J]. IEEE Access, 2021, 9: 166502-166517.

[3] RAHBAR K, CHAI C C, ZHANG Rui. Energy cooperation optimization in microgrids with renewable

energy integration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(2):1482-1493.

[4] NIKFAR B, VINCK A J H. Relay selection in cooperative power line communication;a multi-armed bandit approach[J]. Journal of Communications and Networks,2017,19(1):1-9.

[5] 胡长斌,石向一,罗珊娜,等. 微电网多逆变器并联分散动态扰动补偿控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021,41(13):4425-4439.

[6] 杨向真,苏建徽,丁明,等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术,2010,34(1):164-168.

[7] PATNAIK B,MISHRA M,BANSAL R C,et al. AC microgrid protection-a review; current and future prospective[J]. Applied Energy,2020,271:115-210.

[8] 赵建文,陈佳丽. 基于一模分量的矿井高压电网故障区段定位方法[J]. 工矿自动化,2021,47(10):62-69.

[9] 付林,孟宪珍,廖孟柯,等. 微电网运行控制与保护技术[J]. 轻工科技,2021,37(4):57-58.

[10] 范博士. 面向综合能源服务的电力线载波通信技术研究与应用[D]. 北京:华北电力大学(北京),2021.

[11] 高正中,王亚男,牛慧晖,等. 用于矿井电网电压同步频率检测的改进型 DSOGI-PLL[J]. 工矿自动化, 2020,46(8):75-81.

[12] 颜浩. 基于模型预测控制的微电网优化调度[J]. 电子测试,2021,28(7):58-61.

[13] 王清亮,杨博,高梅,等. 基于等效电导的矿井电网智能漏电保护方法[J]. 工矿自动化,2020,46(6): 59-64.

[14] 张佳. 孤岛微电网中基于电压-频率下垂与磁链-相角下垂两种控制策略的性能比较[J]. 浙江电力, 2021,40(4):25-31.

[15] 高宏杰,赵建文,郭秀才. 煤矿电网单相漏电故障区段自动定位探索[J]. 工矿自动化,2021,47(5): 106-111.

[16] 周一恒,严家明,吴新忠,等. 矿山电力变压器与普通电力变压器绝缘纸老化特性对比分析[J]. 工矿自动化,2020,46(11):34-40.

[17] 屈振兵. 响沙湾煤矿 110 kV 变电站智能化改造[J]. 工矿自动化,2021,47(增刊 2):126-129.

[18] 聂立功,张海军. 基于 GIS 的煤矿井下电力监控管理系统[J]. 工矿自动化,2013,39(11):93-95.

[19] 彭渝,王安义. 基于 TD-SCDMA 的煤矿智能电力故障检测与分析系统[J]. 工矿自动化,2014,40(6): 110-113.

[20] 王清亮,秦洁,刘新茹. 煤矿电网不对称故障辨识与定位方法[J]. 工矿自动化,2018,44(12):71-77.

[21] 罗超,耿蒲龙,曲兵妮,等. 矿井供电系统单相接地故障零模特征仿真研究[J]. 工矿自动化,2018,44(6): 57-63.

(上接第 190 页)

参考文献:

[1] 毛一新. 信息化背景下煤矿自动化技术的有效性探究 [J]. 能源与节能,2023(8):98-101.

[2] 杨林,马宏伟,王岩. 基于激光惯性融合的煤矿井下移动机器人 SLAM 算法[J]. 煤炭学报,2022,47(9): 3523-3534.

[3] 杜肖. 双凸极自励式缓速器的研究[D]. 北京:北京工业大学,2013.

[4] 郑红梅,边尚琪,查传婷,等. 电涡流缓速器优化设计与制动性能分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2024,47(1):21-27.

[5] 田金山,宁克焱,庞惠仁,等. 齿形线圈励磁的新型电涡流缓速器电磁特性[J]. 兵工学报,2023,44(1): 290-297.

[6] 孙为民. 电涡流缓速器的理论研究[D]. 北京:北京工业大学,2005.

[7] 张宁. 电涡流缓速器磁场分析及运动学仿真研究 [D]. 合肥:合肥工业大学,2007.

[8] HOLTSMANN C,RINDERKNECHT F,FRIEDRICH H E. Simplified model of eddy current brakes and its use for optimization [C]. The 10th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies,Stuttgart,2015.

[9] 何仁. 汽车辅助制动装置[M]. 北京:化学工业出版社,2005.

[10] 田金山,宁克焱,庞惠仁,等. 齿形线圈励磁的新型电涡流缓速器电磁特性[J]. 兵工学报,2023,44(1): 290-297.

[11] 宫建平. 矿用自卸车电涡流缓速器的设计及仿真研究 [D]. 大连:大连交通大学,2021.

[12] 濮良贵,陈国定,吴立言. 机械设计[M]. 北京:高等教育出版社,2012.