

Research on Power Supply of Wide-Area Measurement Device in Distribution Network Based on Mixed Energy Storage of Lithium Battery and Super Capacitor

Kai Chen¹, Zhonghan Peng¹, Qirui Wu¹, Jinliang Hu¹, Mu Li¹, Kaikai Gu¹, Ran Gu¹, Haikuo Zhou²

¹State Grid Electric Power Research Institute Wuhan Nari Limited Liability Company, Wuhan Hubei

²School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: 870101143@qq.com, 553969534@qq.com

Received: Nov. 18th, 2019; accepted: Dec. 3rd, 2019; published: Dec. 10th, 2019

Abstract

The development of wide-area synchronous measurement system (WAMS) for distribution network plays an important role in the safe operation of distribution network. In this paper, the functional requirements and power consumption characteristics of distribution network WAMS are analyzed. The low power consumption design is carried out from two aspects: hardware design and software control strategy. In view of the shortcomings of power supply in WAMS device, a new power supply scheme suitable for distribution network WAMS device is proposed. Current transducer (CT) is used as the main power supply, the lithium battery and the supercapacitor are used as the energy element and power element respectively. The test results show that: the composite power supply can supply stable power to the measuring device when the load current of the line is lower than 30 A or power failure.

Keywords

Wide Area Synchronous Measurement, CT Energy Acquisition, Lithium Battery, Supercapacitor, Hybrid Energy Storage

基于锂电池 - 超级电容器混合储能的配电网广域测量装置电源研究

陈 凯¹, 彭仲晗¹, 吴启瑞¹, 胡锦涛¹, 李 穆¹, 谷凯凯¹, 顾 然¹, 周海阔²

¹国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉

文章引用: 陈凯, 彭仲晗, 吴启瑞, 胡锦涛, 李穆, 谷凯凯, 顾然, 周海阔. 基于锂电池 - 超级电容器混合储能的配电网广域测量装置电源研究[J]. 输配电工程与技术, 2019, 8(4): 120-130. DOI: 10.12677/tdet.2019.84015

²武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉
Email: 870101143@qq.com, 553969534@qq.com

收稿日期: 2019年11月18日; 录用日期: 2019年12月3日; 发布日期: 2019年12月10日

摘要

发展应用于配电网线路的广域同步测量系统(WAMS)对配电网的安全运行具有重要作用。本文对配电网WAMS功能要求, 功耗特性进行了分析, 并分别从硬件设计和软件控制策略两方面进行了低功耗设计。针对目前输配电线路同步测量装置供电电源的缺点, 提出了一种适用于配电网WAMS在线监测设备的新型供电电源方案。采用取能式电流互感器作为主供电电源, 锂电池与超级电容器分别作为能量器件和功率器件组成辅助电源。试验测试结果表明: 该复合电源可在线路负荷电流低于30 A或断电时向测量装置稳定供电。

关键词

广域同步测量, CT取能, 锂电池, 超级电容, 混合储能

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

配电网在电力系统中起着分配电能至用户侧的重要作用, 10 kV~35 V 中低压配电网一般采用中性点不接地或经消弧线圈接地的小电流接地方式。配网线路由于大风、雨雪恶劣天气等原因频繁发生单相接地故障, 对变电设备和配电网的安全经济运行造成了严重影响[1] [2] [3] [4] [5]。随着电力系统的发展, 电网对智能化、可靠性的要求逐渐提高, 研究精准可靠的输配电检测系统具有重要意义。以同步相量测量(PMU)为基础的广域同步测量系统(WAMS)在主网中应用较为成熟, 但配网具有线长、面广、运行结构复杂等特点, 需要研究低成本、可靠性高的检测装置并应用到配网信息检测和故障定位中。

应用于配电网线路的 WAMS 主要功能包括: 1) 电流、温度、谐波、三相不平衡、相电场强度监测等在线监测功能; 2) 监测 CT 检测到电流发生较大变化时进行故障录波的功能; 3) 主动上传及召测上传数据信息功能。WAMS 的稳定运行需要 WAMS 监测装置具有可靠的自供电性能。然而, 在诸多情况下尤其是在环境恶劣区域的输配电线路监测装置, 其电源系统往往不能满足装置的用电可靠性、长寿命要求, 限制了其应用与推广。

目前电网监测装置的供能技术主要有太阳能电池取能、蓄电池供能、电压互感器(PT)取能、电流互感器(CT)取能等方案。基于太阳能电池的供电方案存在光能吸收率低、受气候影响严重等弊端, 往往不足以为监测装置供电[6] [7] [8]。以蓄电池作为主供电的方案存在寿命较短、维护成本高、可靠性较差等缺点[9]。基于电压互感器供电方案的监测装置由于铁芯饱和等因素导致的爆炸事故时有发生, 对 WAMS 安全甚至配网线路安全造成了严重影响[10] [11]。基于电流互感器取能的供电方案依靠感应电流获得功率输出, 但配网线路具有负荷波动较大的特点且发生接地故障时母线电流较大, 易出现输出功率过大或过小的情况[12] [13] [14] [15], 难以对监测电路实现稳定供电。针对这些问题, 一些学者通过单一地增加分

压电容、充电电池等方法提升了电流互感器取能输出功率的稳定性[16][17]。但仍存在故障状态超级电容供电能量不足、电池供电功率不足的缺点。

因此,设计稳定可靠的电源对保障高速采样、提高遥测精度和故障监测准确度,尤其是配网常见的单相接地故障监测具有重要意义,是配网 WAMS 发展和推广的必要条件。本文针对现有不同研究的特点和不足,结合配网 WAMS 监测装置用电需求,尤其是针对配电网分布广泛、存在大量小负荷的特点,提出了一种锂电池-超级电容器混合储能系统(HESS)与 CT 取能相结合的复合式供电方案并进行了设计验证。

2. 配电网 WAMS 监测装置结构

配电网 WAMS 监测装置结构如图 1 所示,装置由 8 部分组成。

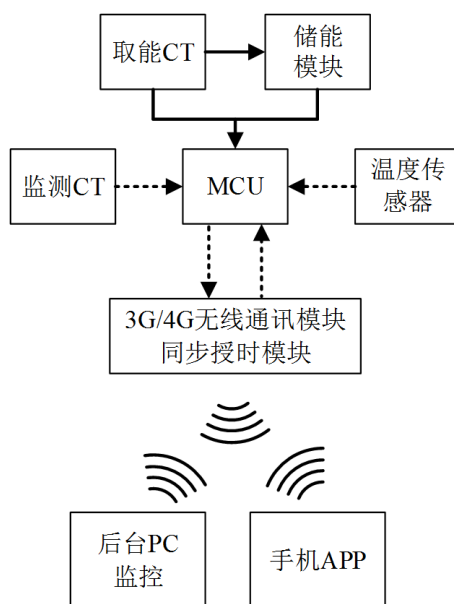


Figure 1. The functional structure of distribution network WAMS monitoring device

图 1. 配网 WAMS 监测装置功能结构

监测 CT 与温度传感器等量测单元实现对线路电气量和非电气量的测量。同步授时模块为域内监测节点提供统一的时间标志和采样依据,可保障量测数据时间标签的一致性。同步授时模块稳定运行并提供精准的时间标志是实现广域同步测量的关键。3G/4G 无线通讯模块负责接收召测或数据读取信号并向后台传输监测数据,实现后台 PC 监控端和手机 APP 全状态监控。MCU 负责数据采集、数据处理、故障识别,是监测装置的核心控制单元。取能 CT 与储能模块作为电源部分向主电路、量测电路、数据传输电路供电。当主电源 CT 取能不足或线路因故障断电时,储能模块作为辅助电源或备用电源保障装置稳定运行。

配网 WAMS 监测装置各部分单元的用电需求特性与功耗特性并不相同。MCU 作为 WAMS 监测装置的核心单元对量测数据进行高速处理,要求较高的供电电压稳定性。3G/4G 无线通讯模块在待机状态功耗较低,但在数据收发状态将出现“爆破电流”,即需要较高的峰值功率。因此,监测装置的系统功耗不稳定,对电源的供电质量要求较高。

3. 负载功率需求分析

随着电网线路监测装置智能化程度的提高,监测准确度与可靠性要求也随之提高[18]。输电线路精确

可靠的在线监测要求提升了监测设备与调度端之间的通讯规约复杂程度，这增大了通讯设备的工作时长。由于通讯设备的工作需要收发高频信号，这使得该类设备的功率需要占据监测装置总功率需求的主要部分。

为了更加具体的了解负载功率需求，现对组成监测设备的模块进行分析，表 1 为配网 WAMS 监测装置主要功能模块的功率特性。

Table 1. Main function module power characteristics of monitoring device

表 1. 监测装置主要功能模块功率特性

功能模块	芯片型号	工作电压(V)	工作电流(mA)	功率需求(mW)
主控 MCU	STM32F407VET6	3.3	51.68	170.544
精密授时模块	NEO-M8T	3.3	35	115.5
AD 转换模块	AD7705	3.3	1	3.3
数据传输模块	Q560	5	48~301, 启动 1500	240~1505, 启动 7500
近场通信模块	NRF2401	3.3	发射: 90 mA 接收: 20 mA	66~297
其它外围电路	N/A	5	20	100
精密授时模块	NEO-M8T	3.3	35	115.5

如表 1 所示，主控 MCU、数据传输模块和近场通信模块功率需求远大于其它功能模块，功耗等级均在 100 mW 以上。根据配网 WAMS 监测装置不同模块的功能特性和功率特性，将设备分为两部分：1) 恒定工作的数据检测和数据处理系统，主要由主控 MCU、精密授时模块、AD 转换模块和采集电路组成，此部分的功耗较为恒定(290 mW)。2) 具有多种工作状态的数据采集和数据传输系统，主要由负责相间设备通信的近场通信模块和远程数据传输模块组成，此部分的功率需求较高。在空闲状态功耗 < 550 mW，最小为 421 mW；在待机状态功耗 < 450 mW，最小为 306 mW；在数据收发状态功耗水平显著提高功率波动较大(537~1497 mW)；在初始启动状态，瞬间工作电流可达 1.5 A 以上，瞬间功耗高达 7.5 W 以上。

综上，配网 WAMS 监测装置的系统正常工况功耗为(1010~2191 mW)，平均功耗约为 1450 mW，短时功耗高达 7.5 W 以上。这要求检测装置电源的短时供电能力不低于 7.5 W，长时间供电能力不低于 1.1 W。

4. 低功耗软件控制策略

除了在硬件设计阶段选用低功耗器件外，通过制定相应的软件控制策略也可降低系统的功耗。图 2、图 3 分别是本文设计的低功耗数据采样策略和低功耗数据传输策略。

数据采样包含低功耗采样和高速采样两种模式。在低功耗采样模式时，线路电流是正常的负荷电流。低功耗采样仅通过定时或召测唤醒的方式进行采样，休眠期较长。当检测出较大的故障电流时，系统转为采样频率更高的高速采样模式，从而更加精确的监测线路的故障状态。

数据传输包含“接收 - 休眠”、“接收 - 发送 - 休眠”和“接收 - 发送”三种模式。系统根据供电电源的实时供电水平确定数据传输模式，若取能 CT 输出功率较低，通讯设备工作于模式一和模式二。在“接收 - 休眠”模式时，设备处于“接收 - 休眠 - 接收”循环状态，系统仅接收远程调度端指令。在该模式下，可根据具体需求调整休眠占比使功耗最低。当设备收到唤醒指令后，发送数据传输确认完成握手交互。在“接收 - 发送 - 休眠”模式时，通讯设备每隔 15 min 进行一次数据收发操作。当取能 CT 输出功率完全满足通讯设备功率需求时，进入“接收 - 发送”模式。发送数据产生较高的尖峰电流使设备功耗升高，但上述低功耗数据传输策略有效降低了设备的平均功耗且实现稳定的数据传输。

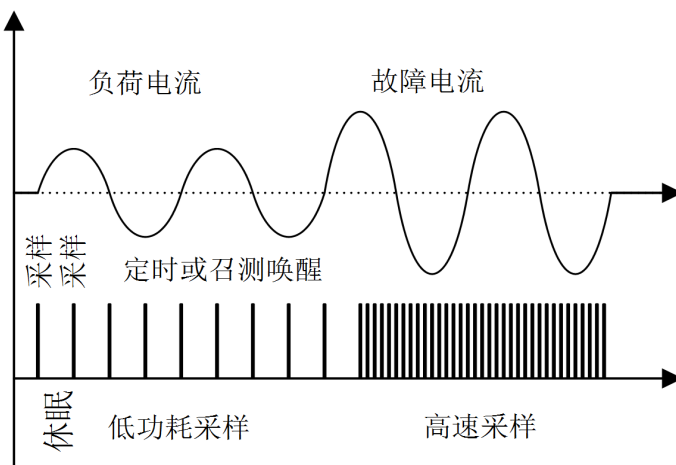


Figure 2. Low power sampling strategy
图 2. 低功耗采样策略

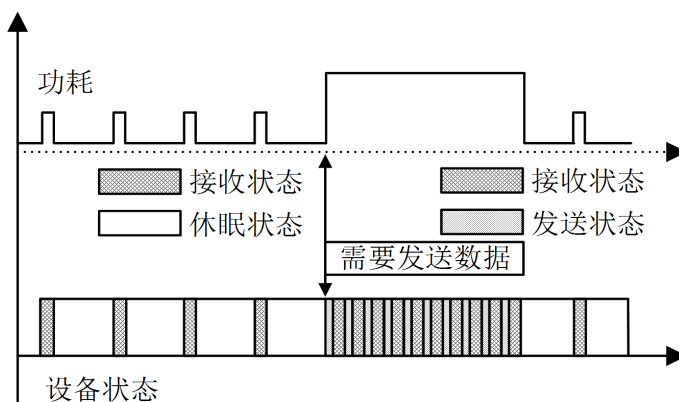


Figure 3. Low power data transmission strategy
图 3. 低功耗数据传输策略

5. 低功耗软件控制策略

5.1. 储能电池类型选择

二次电池引起可重复利用的特点被广泛用作电子设备的储能元件，近年来超级电容因其具有较高的循环寿命和快速充放电特性受到广泛关注。表 2 为各种类型的储能元件特性。由表可知，传统的镍氢、镍镉及铅酸电池虽具有成本低的特点，但其能量密度和功率密度均较锂电池和超级电容低。此外，由于传统电池的工作电压较低，往往需要 2~3 节电池串联使用，组成的储能系统重量和体积远大于锂电池和超级电容器，并不适用于对重量和体积要求较高的架空输电线路在线监测装置。

Table 2. Characteristics of common energy storage device
表 2. 常见储能电池特性[19] [20]

类型	种类	电压(V)	能量密度 (W·h·kg ⁻¹)	功率密度 (W·kg ⁻¹)	循环寿命 (周期)	自放电率	安全性	成本 (元·Wh ⁻¹)
传统电池	镍氢电池	1.2	60~80	180~320	500~1000	30%~35%	差	3.3
	镍镉电池	1.2	40~60	150~300	500~1000	20%~30%	中	1.9
	铅酸电池	2	30~45	200~300	300~500	4%~5%	差	2.5

Continued

锂电池	磷酸铁锂	3.2	150~190	250~450	>2000	3%	优	2.5
	三元锂	3.7	250~300	200~300	>1000	<1%	中	3.1
	钛酸锂	2.3	55~90	350~550	>10,000	<1%	优	3.3
电容器	超级电容	2.7/5.5	0.7~4.3	1200~16,000	>200,000	<1%	优	459.3
	普通电容	宽范围	<0.1	20~150	40,000 h	N/A	优	N/A

近年来由于消费电子市场和新能源汽车领域的发展,锂离子电池得到了广泛应用且性能显著提升。锂离子电池根据正负极材料的不同可分为磷酸铁锂电池、锰酸锂电池、钴酸锂电池、NMC 三元锂电池和钛酸锂电池等多种类型。应用最多的锂电池类型为表 2 所示的磷酸铁锂电池、三元锂电池和钛酸锂电池。

磷酸铁锂电池的功率密度和寿命特性较好,但其能量密度和自放电率相对其它类型的锂电池较差。当输电线路发生故障停电后,要求在线监测装置将故障线路进行录波和数据上传并提供较长时间的续航时间,此时设备仅由储能模块供电。且磷酸铁锂在低温环境下的容量和充放电性能将大幅下降,而输电线路在线监测装置多工作在室外和野外环境。冬季时设备的工作温度较低,使用磷酸铁锂电池存在储能模块供电能力不足的风险。

钛酸锂电池指负极材料为钛酸锂的锂离子电池,具有功率密度高、循环寿命长、低温性能良好的优点。但其能量密度和单体电压水平较低,组成的储能模块同样不适用于输电线路在线检测装置。

三元锂电池指正极由镍、钴、锰组成的三元材料电池,具有能量密度高、自放电率低、单体电压水平高的特点,且其在低温环境下的性能表现优于磷酸铁锂电池。综上,三元锂电池更适用于配网 WAMS 在线监测装置。

超级电容又称法拉电容、储能电容。不同于普通的传统电容器,超级电容是一种依靠电化学双电层原理和极化电解液进行电能储存的新型电化学双层电容器[21]。由于电解液界面不存在离子迁移,仅通过极板上电荷转移的物理过程实现充放电。但超级电容使用多孔碳作为电极增大了吸附电荷的表面积,这使其具有介于传统电容和二次电池之间的储能特性。虽然超级电容的能量密度较低,但其功率密度远高于二次电池和普通电容,可应用于需要大电流充放电的场景[22]。而配网 WAMS 在线监测装置的工作特性决定了供电电源需要瞬间释放或吸收较大电流,因此使用超级电容作为功率补充器件。

综合考虑各类型储能电池的特性和监测装置的供电要求,选择三元锂电池与超级电容作为构成 HESS 的储能器件。

5.2. 供电电源设计

随着智能电网的发展,监测装置的可靠性要求逐渐提高。这要求监测装置具有稳定可靠的自供电能力,图 4 为本文采用的电源设计方案。

取能 CT 作为主要的供电电源向负载供电,但线路负荷过小或线路断电时无法满足负载的用电需求,此时 HESS 接入电路向负载独立或辅助供电。线路负荷过大时,取能 CT 的输出功率除向负载供电外还用于向储能系统充电。

锂电池与超级电容一般按照如图 5 所示的四种结构组成 HESS,对四种结构作具体分析。

被动模型——如图 5(a)所示,电池与超级电容直接并联,电池和超级电容的电流变化是一种被动的适配过程。电池的电流不易控制且易出现放电倍率过大的情况,HESS 的可利用能量和功率受到限制。但这种结构较为简单,适用于低成本、能量和功率密度要求较低的用电设备;

半主动模型——如图 5(b)~(c)所示,电池经 DC/DC 变换器与超级电容并联或超级电容经 DC/DC 变换

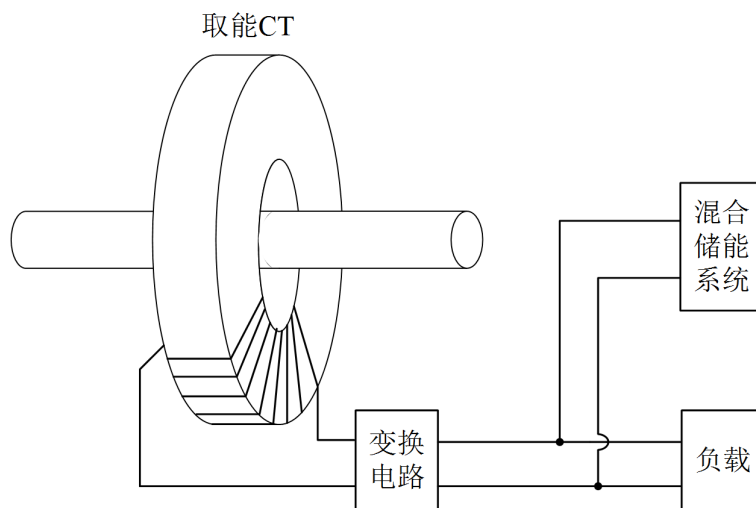


Figure 4. Power supply structure of distribution network WAMS monitoring device

图 4. 配网 WAMS 监测装置供电电源结构

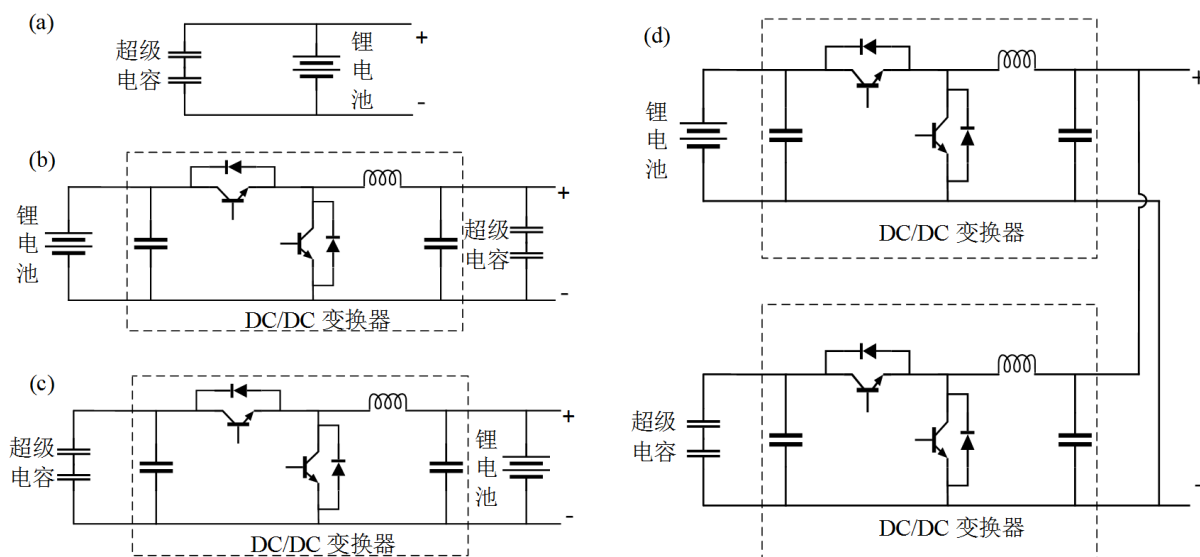


Figure 5. Topological of hybrid energy storage of lithium battery and supercapacitor

图 5. 锂电池与超级电容混合储能拓扑结构

器与电池并联。当电池经 DC/DC 变换器与超级电容并联时，DC/DC 输入端电压稳定而输出端电压可在一定范围内波动，提高了超级电容的利用率。这种结构适用于超级电容主要供能且负载允许电压波动较大的用电设备；当超级电容经 DC/DC 变换器与电池并联时，DC/DC 输出端电压较为稳定，从而限制了超级电容的能量利用。这种结构适用于电池主要供能、超级电容起功率辅助作用的用电设备。

主动模型——如图 5(d)所示，超级电容和电池分别经其支路 DC/DC 变换器并联连接。这种结构的特点在于电池与超级电容均与负载解耦，可实现更加精准的能量流控制。但由于双 DC/DC 的使用，HESS 的控制复杂度和能量损失进一步提升。这种结构适用于要求母线电压稳定或工况较为复杂的系统。

用于配网 WAMS 监测装置的 HESS 属于低压小电流系统，是重要的备用和辅助电源，且单片机直流系统对供电电压稳定性要求较高。因此综合考虑低功耗要求、锂电池和超级电容在监测装置 HESS 中的

功能属性, 选择图 5(c)所示的半主动模型作为系统拓扑进行设计。

5.3. 储能容量选择

为了使配网 WAMS 设备能长期可靠运行, HESS 应在线路发生故障后独立为监测装置供电不低于 12 小时。因此需要选用合适容量的锂电池和超级电容以满足线路断电期间监测装置的用电能量和功率需求。

锂电池作为能量器件提供 HESS 的平均功率。首先保持设备在线路断电和通电前后 15 min 处于“高速采样”和“接收-发送”模式, 此时平均功率为 1.9 W; 还应使设备保持不低于 11.5 小时的低功耗工作状态, 此时平均功率为 0.35 W。为了保证 HESS 能够有效工作, 综合考虑电池和周围电路特性, 根据式(1)确定电池的容量:

$$C_B = \frac{Pt}{U_S S_1 S_2 \eta_{DC1}} \quad (1)$$

式中, P 为负载功率; t 为供电时间; U_S 为电路母线电压; S_1 为荷电状态(SOC)限制率, 为了提高电池寿命并防止过充过放, 使其工作在 20%~85% SOC 范围内, S_1 值为 0.65。为了在电池容量衰减后仍满足供电要求, 使用容量剩余比 S_2 作为设计冗余, S_2 值为 0.8。锂电池工作电路效率 η_{DC1} 为 90%。

超级电容作为功率器件提供 HESS 的峰值辅助功率, 按照连续输出不低于 10 秒的最高功率、独立供电时间不低于 15 min 进行容量选择。本文中超级电容串联数较少, 忽略等效串联电阻导致压降的影响。功率保持期间消耗的能量为:

$$W_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{IU_s t}{\eta_{DC2}} \quad (2)$$

根据电容的固有特性, 超级电容器储存的能量为:

$$W_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CU^2 \quad (3)$$

超级电容器周围电路最低工作电压为 4.75 V, 则每个单体从 5.4 V 电压下降至 4.75 V 时释放的能量为:

$$\Delta W = \frac{1}{2} C (U_{\max}^2 - U_{\min}^2) \quad (4)$$

由于能量守恒, $\Delta W = W_k$, 则超级电容的容量计算公式为:

$$C_{SC} = \frac{2 \cdot \Delta W}{U_{\max}^2 - U_{\min}^2} \quad (5)$$

根据式(1)~式(5)及监测设备的功率特性参数, 计算得锂电池的容量 $C_B > 2.5\text{Ah}$, 超级电容的容量 $C_{SC} > 223.6\text{F}$ 。因此选用容量为 3.4 Ah 的 SAMSUNG 三元锂离子电池和 2.7 V/50 F 的 Panasonic 超级电容构成 HESS, 其中锂离子电池为 1 串 1 并结构、超级电容为 2 串 10 并结构。

6. 实验验证

本文设计的供电电源通过将开合式取能 CT 套在输电线路感应取电作为主供电电源, 锂离子电池与超级电容器构成的 HESS 作为辅助电源和备用电源供电。

搭建的实验平台如图 6 所示, 包括 CT 取能模块、储能模块、万用表、电流钳、直流电源、电子负载、220 V 市电、20 Ω 负载电阻等组成。通过 220 V 市电接入负载电阻产生一次侧电流 I_R , 载流导线对取能 CT 穿心 N 次近似取得 NI_R 的一次侧电流[22]。

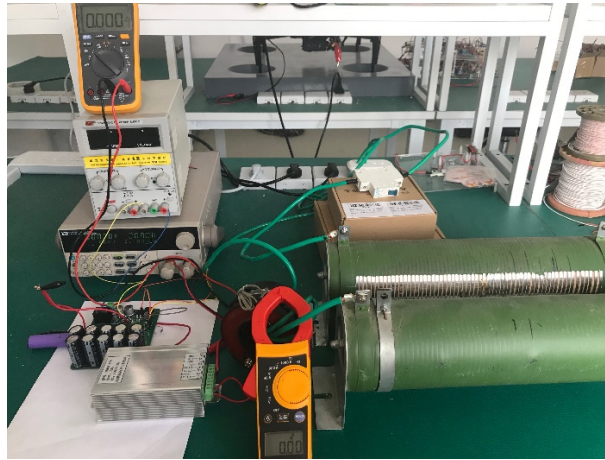


Figure 6. Experimental platform of CT energy harvesting and energy storage coupling system

图 6. CT 取能与储能模块耦合系统实验平台

根据线路负荷状态和监测装置的工作状态, 可将供电电源划分为 CT 取能充足、CT 取能不足和 CT 不取能三种工况。首先, 通过改变穿心次数 N 实现 CT 一次侧电流的变化, 模拟 CT 取能时三种不同的功率输出工况。其次, 通过改变电子负载的功率设置模拟不同的负载功率需求。最后使用高精度万用表与电流钳测得 CT 取能模块、电池模块和超级电容模块的电流与电压值计算出 CT 取能输出功率、电池与电容的平均功率。

Table 3. Power distribution of distribution network WAMS device

表 3. 配网 WAMS 装置电源与负载功率分配

电源工况		CT 一次侧 电流(A)	CT 输出 功率(W)	电池平均 功率(W)	电容平均 功率(W)	负载 功率(W)
CT 取能充足	CT 供能且向 储能模块充电	40.52	3.5	-1.018	-0.262	2.22
	CT 供能	31.62	2.6	0	0	2.22
CT 取能不足	CT 和储能模 块同时供电	10.98	0.490	0.442	0.078	1.01
		10.98	0.490	1.588	0.142	2.22
CT 不取能	储能模块供电	0	0	0.651	0.359	1.01
		0	0	0.822	1.398	2.22

如表 3 所示, 当 CT 一次侧电流约为 30 A 时, CT 输出功率完全满足负载功率需求, 混合储能系统的充放电达到平衡(功率约为 0)。这表示配网线路电流较低时, 所设计的电源仍可满足 WAMS 测量装置的全时负载需求。当 CT 取能输出功率较大时, 若储能模块未充满电, 则 CT 取能模块应在向负载供电的同时向储能模块充电。在 CT 一次侧电流约为 40 A 时, CT 输出功率不仅满足负载功率需求, 且电池与电容均有充电功率输入。

当 CT 一次侧电流过小时, CT 取能模块应和储能模块同时供电。表 3 中 CT 一次侧电流约为 10 A 时, CT 取能模块、电池和电容均有放电功率输出。若线路断电, 储能模块应单独向负载供电。在线路断电的工况下, WAMS 装置处于低功耗模式时, 其负载功率较小。负载功率需求为 1.01 W 时, 电池平均功率为 0.651 W, 大于电容平均功率 0.359 W, 这表示负载较小时锂电池出力大于超级电容。而装置处于数据

收发模式时,其负载功率较大。负载功率需求为 2.22 W 时,超级电容输出 1.398 W,而锂电池功率输出较小的 0.822 W 功率,这表示负载较大时超级电容作为功率器件可有效提供主要功率支撑。

7. 总结

针对配电网运行特性及适用于配电网 WAMS 的测量装置负载特性,提出了一种 CT 取能模块作为主电源,基于锂电池-超级电容器混合储能的储能模块作为辅助和备用电源的供电电源方案。在软件设计和硬件设计两方面进行低功耗设计,根据负载功率特性确定了储能元件容量,最后在模拟环境下进行了 CT 取电与混合储能联合供电实验。测试结果表明,线路电流大于 30 A 时即可满足 CT 全时供电并向储能模块充电。当线路电流过小甚至故障停电时,CT 取能与混合储能协同供电可有效满足负载需求。锂电池作为能量型元件可在功率需求较小时提供主要功率支撑,超级电容器作为功率型元件可在功率需求较大时提供主要功率支撑。该设计可使测量装置在多种不同工况下正常运行。锂电池、超级电容器组成小型混合储能系统,可有效避免因偏远线路电流过小导致的取能 CT 输出功率不足、线路停电或锂电池老化造成的监测装置失效,提高了配电网 WAMS 的稳定性和可靠性。

基金项目

南瑞集团自立科技项目《基于广域同步测量的配电网故障定位关键技术研究》。

参考文献

- [1] 吕健双,李健,罗超. 不均匀冰对重冰区特高压输电线路对地及交叉跨越距离的影响分析与研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(3): 35-38.
- [2] 吴巧玲,缪希仁,叶臻芳. 高压输电线路短路故障早期检测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 50-55.
- [3] 刘宏森,李迎华,王恒,等. 基于实时小波变换的配网短路故障快速检测技术[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 225-230, 237.
- [4] 刘胜波,阳林,郝艳捧,等. 中国沿海地区电网覆冰灾害风险评估[J]. 广东电力, 2017, 30(12): 1-6.
- [5] 黄新波,蒋兴良. 智能电网输电线路在线监测技术进展[J]. 广东电力, 2014, 27(6): 72-76.
- [6] 李震宇,武国亮,王志利,等. 电力微气象风偏灾害监测预警技术及系统实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 125-131.
- [7] 赵东生,戴栋,李立涅,等. 变压器的阻抗变换特性在交流输电线路杆塔侧电场能采集中的应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 3967-3972.
- [8] 朱永灿,黄新波,张冠军,等. 输电线路在线监测设备供电电源应用分析[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 231-236.
- [9] 郭岫,王鹏,张冀川,等. 高压输电系统电磁能量收集与存储技术综述[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(1): 32-46.
- [10] 胡长春. 10kV 电压互感器运行故障原因分析及改进措施[J]. 中国新技术新产品, 2018(24): 91-93.
- [11] 涂刚. 10kV 电压互感器损坏原因分析及防范措施[J]. 电工技术, 2018(19): 96-97, 99.
- [12] 王玮,贾明娜,张新慧,等. 一种电子式电流互感器的高压侧设计[J]. 自动化仪表, 2016, 37(1): 81-84.
- [13] 王黎明,李海东,陈昌龙,等. 新型高压输电线路下限死区大功率在线取能装置[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 344-352.
- [14] 赵强松,叶永强,徐国峰,等. 一种适用于小电流母线的电子式电流互感器供电电源[J]. 电力系统自动化, 2015(19): 121-125.
- [15] Li, P., Wen, Y., Zhang, Z., et al. (2015) A High-Efficiency Management Circuit Using Multiwinding Upconversion Current Transformer for Power-Line Energy Harvesting. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62, 6327-6335. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2431648>
- [16] 李衍川,江和. 新型高压侧自供电电源设计与研究[J]. 电工电能新技术, 2014(8): 77-80.
- [17] 赵东生,戴栋,邓红雷,等. 交流输电线路杆塔侧的电势能采集可行性研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015(4): 119-125.

- [18] 李岩, 滕云, 冷欧阳, 等. 数据驱动的输电线路在线监测装置可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4410-4419, 4641.
- [19] 胡中华, 荣海春, 吴有恒, 等. 超级电容在无人机电气系统中的应用探讨[J]. 自动化与仪表, 2018, 33(9): 99-103.
- [20] 李泉. 锂离子动力电池管理系统关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [21] 刘云鹏, 李雪, 韩颖慧, 等. 锂离子超级电容器电极材料研究进展[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1140-1148.
- [22] 周健瑶. 结合超级电容和锂电池的电流互感器取能电源研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2014.