

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.08.015

## 电容器监测用小型低功耗取能线圈的研究

徐辉<sup>1</sup>, 雷战斐<sup>1</sup>, 史磊<sup>2</sup>, 赵欣洋<sup>1</sup>, 林丽妲<sup>3</sup>, 柴斌<sup>1</sup>, 秦有苏<sup>1</sup>

(1. 国网宁夏电力公司超高压公司, 银川 750011; 2. 国网宁夏电力有限公司, 银川 750011; 3. 西安西电电力电容器有限责任公司, 西安 710082)

**摘要:** 为方便电容器在线监测信号取能, 克服现有取能线圈功耗高、发热严重、结构复杂等缺点, 文中采用直流侧磁通补偿技术, 开发了电容器监测使用的小型低功耗取能线圈。首先, 分析了电磁感应取能线圈最大功率及功耗与尺寸、负载的关系, 提出了直流侧磁通补偿的方案, 该方案通过限压电容器、防反二极管、迟滞比较器以及全桥整流器构成一个磁通补偿回路, 可以动态的实现线圈主磁通的补偿, 实现用小截面积的铁心在较大一次电流范围的取能, 且不需要进行特殊的散热设计。然后用PSPice仿真验证了该方案的效果, 并进一步进行了电路设计与试验, 试验结果与仿真结果吻合, 所设计方案具有广泛的应用前景。

**关键词:** 电容器在线监测; 直流侧磁通补偿; 取能线圈; 小型; 低功耗

### Research on Small and Low Power Energy Harvesting Coil for Capacitor Monitoring

XU Hui<sup>1</sup>, LEI Zhanfei<sup>1</sup>, SHI Lei<sup>2</sup>, ZHAO Xinyang<sup>1</sup>, LIN Lida<sup>3</sup>, CHAI Bin<sup>1</sup>, QIN Yousu<sup>1</sup>

(1. Maintenance Company of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China; 2. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China; 3. Xi'an XD Power Capacitor Co., Ltd., Xi'an 710082, China)

**Abstract:** For the convenience of energy harvesting of on-line monitoring signal of capacitor and overcoming such shortcomings as high power consumption, serious heating and complex structure of existing energy harvesting coil, in this paper the DC-side magnetic flux compensation technology is used to develop a small and low-power energy harvesting coil for capacitor monitoring. Firstly, the relationship among the maximum power and power consumption of the energy harvesting coil, and its size as well as load is analyzed. The magnetic flux compensation scheme on the DC side is proposed, which forms a magnetic flux compensation circuit through voltage limiting capacitor, anti-reverse diode, hysteresis comparator and a full-bridge rectifier to dynamically achieve compensation of the main magnetic flux of the coil. Thus, the energy harvesting can be made in a large primary current range with a small area of the magnetic core without special heat dissipation design. Then, the effect of the scheme is verified by PSPice simulation, the circuit design and testing are performed further and the test result and simulation result are in agreement. The designed scheme has a wide application prospect.

**Key words:** online monitoring of power capacitor; DC side magnetic flux compensation; energy harvesting coil; small size; low power consumption

## 0 引言

额定电压 35 kV 及以上的电容器组, 其电容器单元往往安装在绝缘平台上, 无法通过地面供电,

为了对其进行在线监测, 必须进行在线取能。取能线圈是一种常用的在线取能装置<sup>[1-3]</sup>, 由铁心、线圈、整流器、滤波器、直流降压芯片等部分组成<sup>[4-6]</sup>, 为了避免取能线圈铁心在大电流时发生磁饱和而感应

收稿日期: 2025-01-20; 修回日期: 2025-03-29

基金项目: 国网宁夏电力有限公司科技项目(5229CG220009)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd.(5229CG220009).

出脉冲高电压,对于取能线圈的研究主要聚焦于如何避免铁心饱和,为此设计出了多种方案,主要分为3类:泄能装置、补偿线圈以及晶闸管控制<sup>[7-11]</sup>。

泄能装置的思路是通过稳压二极管、三极管等器件组成电路,使二次线圈直流侧的电压稳定在某一较高的电压值,当一次电流增加时,通过泄能装置的电流增加,对铁心中的磁通进行抵消,避免铁心饱和。当一次电流增加时,为了保持二次电压的稳定,泄能装置的电流也会随之增加,这样泄能装置上既有很大的压降,又流过很大的电流,其功耗很大发热严重。因此,在电流变化比较大的场合,泄能装置并不适用<sup>[12-14]</sup>。补偿线圈是在铁心上除了绕有取能线圈外还绕有补偿线圈,两个线圈的绕向相反,当二次线圈电压增加到某一设计值时,接通补偿线圈,将一部分电流分流至补偿线圈,补偿线圈产生的磁通与取能线圈相反,使铁心中的总磁通保持在一个合理的范围。该方案避免了发热问题,但需要绕制二组线圈,同时需要安装继电器以及控制驱动电路,结构复杂,且当补偿线圈被接入电路时,存在铁心磁通突变的可能<sup>[15-16]</sup>。晶闸管控制是将晶闸管连接在线圈的交流侧,通过改变晶闸管导通角改变线圈的实际耦合功率。该方案可以实现很大电流范围内线圈输出功率的稳定,且铁心不会饱和,甚至可以实现线圈输出功率的连续调节。但晶闸管成本较高,且需要配置控制驱动电路、相位识别电路、以及控制逻辑电路,实现难度很大<sup>[17-21]</sup>。

由于电容器额定电流变化范围大,安装空间有限,为了克服上述缺点,对取能线圈的原理和电路进行了研究,设计了一种小型低功耗取能线圈,并对线圈性能进行了仿真和试验验证,结果表明该取能线圈具有发热量少、适用一次电流范围大的优点。

## 1 取能线圈特性的研究

### 1.1 取能线圈的基本原理

取能线圈示意图见图1。取能线圈由铁心以及缠绕在铁心上的线圈组成,当一次电流为 $I$ 时,会在周围空间产生相应的磁场强度,由于铁心的磁导率很高,约为空气的2 000倍,所以铁心中会产生较大的磁感应强度,在铁心未饱和时,铁心线圈满足<sup>[22-24]</sup>

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{kN}i = -\frac{1}{N} \cdot \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

式(1)中: $I$ 为一次电流; $i$ 为二次电流; $R$ 为线圈负载电阻; $N$ 为线圈匝数; $k = \frac{NS\mu}{2\pi r}$ , $S$ 为铁心截面积, $\mu$ 为铁心磁导率, $r$ 为铁心等效积分半径。

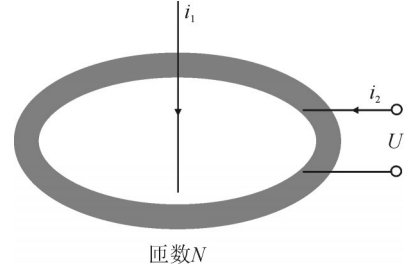


图1 取能线圈示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the energy harvesting coil

取 $I=A\cos(\omega t+\varphi)$ ,对式(1)进行求解可得

$$i(t) = A\omega \frac{kR \sin(\omega t + \varphi) - k^2 N\omega \cos(\omega t + \varphi)}{R^2 + (kN\omega)^2} \quad (2)$$

式(2)中: $A$ 为一次电流的幅值; $\omega$ 为一次电流角频率; $\varphi$ 为一次电流相位角。

线圈二次侧电压 $u$ 满足以下关系

$$u(t) = A\omega \frac{kR^2 \sin(\omega t + \varphi) - Rk^2 N\omega \cos(\omega t + \varphi)}{R^2 + (kN\omega)^2} \quad (3)$$

由式(2)、(3)可知,若不考虑铁心的饱和,线圈二次侧电压随一次电流的增加而增加,随负载电阻的增加而增加;若负载电阻等于0,即线圈二次侧短路时,二次电流为

$$i(t) = \frac{A}{N} \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

当负载电阻为无穷大,即二次侧开路时,二次电压为

$$u(t) = Ak\omega \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

根据式(1),计算出二次电流有效值

$$\tilde{i} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{kA\omega}{\sqrt{R^2 + (kN\omega)^2}} \quad (6)$$

二次线圈的输出功率为

$$P = \frac{1}{2} \frac{k^2 A^2 \omega^2 R}{R^2 + (kN\omega)^2} \quad (7)$$

线圈的功率随负载电阻的增加先增加后减小,其曲线见图2。

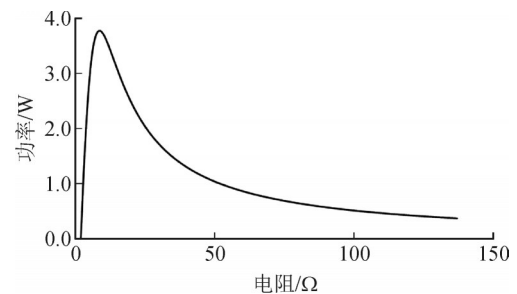


图2 功率随负载电阻的变化曲线

Fig. 2 The power change curve with resistance

### 1.2 铁心的磁饱和

当磁场强度增加到一定值时,铁心的磁感应强度不再增加,即铁心饱和现象。在铁心由线性区进

入饱和区时,磁化曲线发生突变,由于线圈二次电压与磁通的变比速率成正比,因此发生饱和时二次侧会感应出很高的脉动电压<sup>[25-27]</sup>,见图3。二次侧开路时,容易出现磁饱和的现象,此时,输出脉冲高压而电流为0,输出功率为0;当二次侧短路时, $i_2$ 与 $i_1$ 产生的磁势完全抵消,二次侧电压为零,输出功率为0。二次侧电流可以抵消铁心中的磁场强度,增加二次侧电流可以抑制由于磁饱和导致的二次侧脉冲电压。

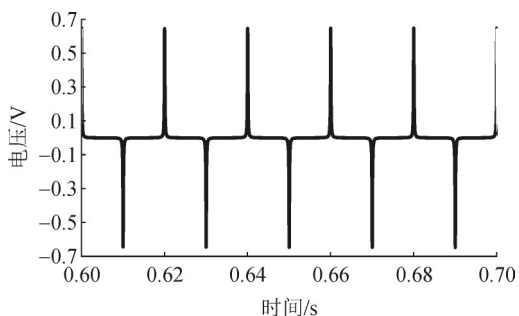


图3 磁饱和时的二次侧电压

Fig. 3 Secondary side voltage while the core saturated

### 1.3 取能线圈参数的选择

将  $k = \frac{NS\mu}{2\pi r}$  代入式(7),可得

$$\frac{1}{P} = \frac{2}{A^2} \left[ \left( \frac{2\pi r}{NS\mu} \right)^2 \frac{R}{\omega^2} + \frac{N^2}{R} \right] \quad (8)$$

取能线圈的最大功率与铁心截面积以及一次电流的平方成正比,与铁心等效积分半径的平方成反比。取能线圈负载电阻约为  $180 \Omega$ ,要求一次电流  $35 \sim 120 \text{ A}$  时输出功率不小于  $1 \text{ W}$ ,线圈内径大于  $75 \text{ mm}$ ,并尽可能减小线圈尺寸。设计铁心为硅钢片制成,相对磁导率为  $8\,500$ ,铁心内径为  $90 \text{ mm}$ ,线圈匝数为  $300$  匝,采用  $0.8 \text{ mm}$  线径的铜心高压漆包线,一次电流有效值为  $35 \text{ A}$ ,频率为  $50 \text{ Hz}$ 。目标取能功率大于  $1 \text{ W}$ ,铁心截面积必须足够大,将参数代入式(8),改变截面积  $S$ ,可得线圈输出功率与截面积的关系,见图4。铁心截面积为  $1.5 \text{ cm}^2$  时,线圈功率为  $1.11 \text{ W}$ ,可以满足最低电流下的负载需要,故取铁心截面尺寸为  $1 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$ 。

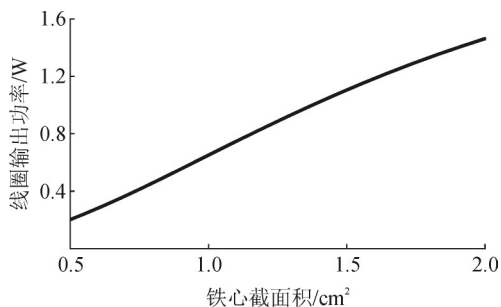


图4 铁心截面积与线圈功率的关系

Fig. 4 Relationship of output power of the coil with the area of the core

## 2 磁通补偿电路

线圈尺寸保证了在最小电流下可以可靠供电,而当一次电流变大时就会使二次电压增加,如使用最常见的稳压管泄能电路,见图5。稳压管上会流过较大的电流,导致稳压管发热严重,必须增加才能保证取能线圈在大电流下正常运行,这增加了取能线圈的体积和成本。

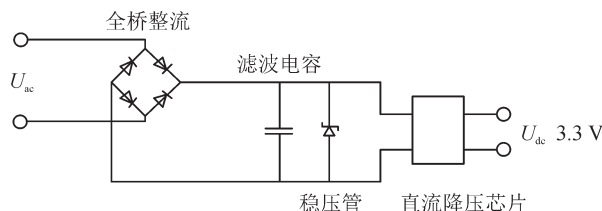


图5 稳压管泄能电路

Fig. 5 Zener tube energy drain circuit

根据对取能线圈原理的分析结果,若在不需要时将二次侧短路,则短路期间二次侧的输出功率为0。为此设计的磁通补偿电路见图6。

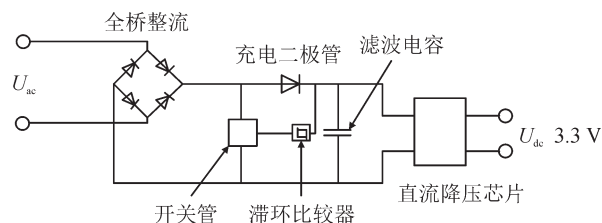


图6 磁通控制原理图

Fig. 6 Magnetic flux control schematic

滞环比较器的作用是当滤波电容电压大于电压上限时,控制开关管导通,线圈二次侧被短路,二次侧电压降为接近为0,铁心总磁通接近0,线圈二次侧输出功率接近0。此时滤波电容  $C$  通过负载放电,电压逐渐降低。当滤波电容  $C$  两端的电压小于电压下限时,控制开关管关断,线圈二次侧通过二极管向滤波电容  $C$  充电,电压升高,铁心总磁通增加,二次侧输出功率增加。通过滞环控制,滤波电容电压在电压下限和上限之间波动,再用直流降压芯片对电压进行调理,即可得到稳定的直流低压,控制的流程见图7。

电源共需供电约  $1 \text{ W}$ ,为保证负载供电,在一次电流为  $35 \text{ A}$  时,设计耦合功率约  $1.1 \text{ W}$ ,根据图6所示的原理图设计电源调理电路,通过滞环比较控制的滤波电容器电压变化范围为  $11 \sim 17 \text{ V}$ 。

## 3 取能线圈性能的验证

### 3.1 取能线圈性能的仿真计算

应用 PSpice 对该线圈进行仿真,一次电流为

50 A时, 滤波电容的电压波形见图8。

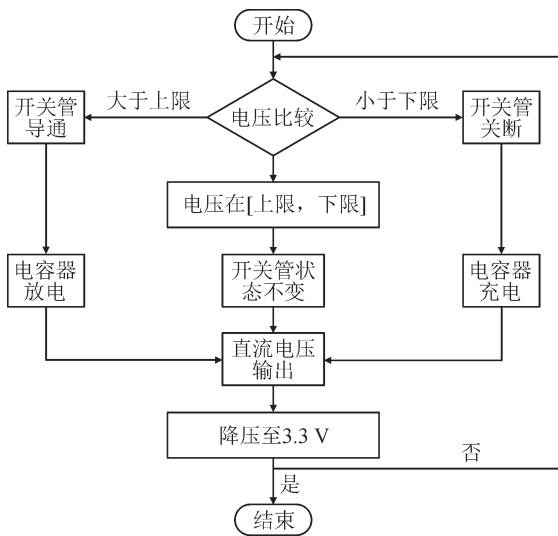


图7 磁通控制流程图

Fig. 7 The flow chart of magnetic flux controlling

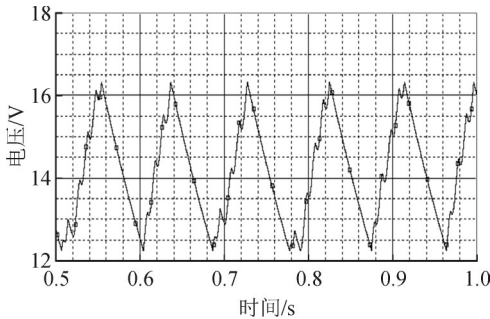


图8 滤波电容器上的电压波形

Fig. 8 The waveform of the capacitor voltage

一次电流由35~110 A变化时, 线圈的输出功率见图9。若采用稳压管泄能电路, 线圈输出功率为1.5~4.5 W; 而采用直流侧磁通补偿电路时, 线圈输出功率为1.5~1.7 W。磁通控制电路显著降低了线圈在较大一次电流下的输出功率, 根据能量守恒, 除去负载消耗的大约1 W功率, 线圈输出的多余能量都以热能的形式消耗掉, 故该电路将减少二次侧的总发热。

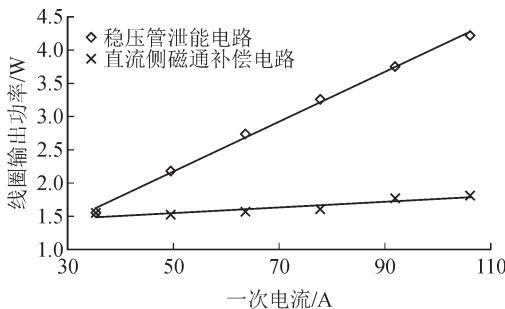


图9 线圈输出功率随一次电流的变化

Fig. 9 Variation of output power with primary current

### 3.2 取能线圈性能的试验验证

一次电流为35 A时, 整流器交流侧电压波形见

图10, 滤波电容上的电压波形见图11, 整流芯片大约有一半的时间处于输出状态, 滤波电容上的电压维持在下限附近。

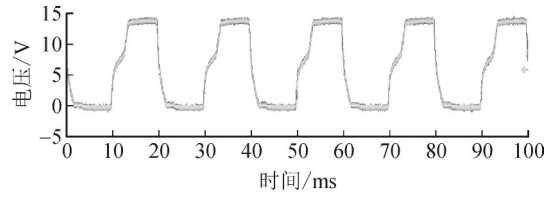


图10 一次电流35 A时整流器交流侧电压波形

Fig. 10 The AC side voltage of the rectifier when the primary current is 35 A

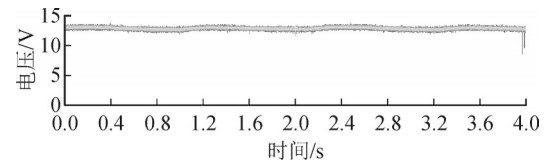


图11 一次电流35 A时滤波电容器上的电压波形

Fig. 11 The waveform of the capacitor voltage when the primary current is 35 A

一次电流为120 A时, 整流器交流侧电压波形见图12, 滤波电容上的电压波形见图13。整流器只有很短的时间处于输出状态, 其余时刻为短路状态, 滤波电容上的电压在11~17 V之间波动, 波形与设计仿真吻合。当整流器直流侧被短路时, 根据电流的变比关系, 二次侧电流有效值大约为0.4 A, 整流器压降大约1.4 V, 故整流器上的功率损耗大约为0.56 W, 且为间断性发热, 不足以引起显著发热。

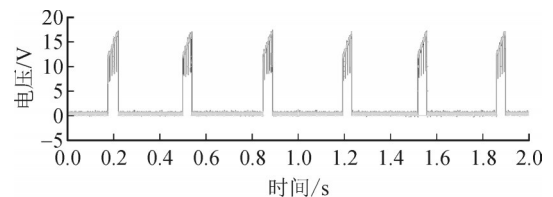


图12 一次电流120 A时整流器交流侧电压波形

Fig. 12 The AC side voltage of the rectifier when the primary current is 120 A

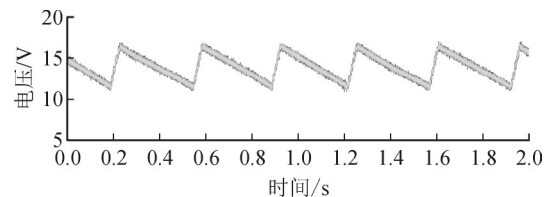


图13 一次电流120 A时滤波电容器上的电压波形

Fig. 13 The waveform of the capacitor voltage when the primary current is 120 A

经过测量, 在120 A的一次电流下, 取能线圈功率60 min后, 整流器芯片的温升为3.8 °C, 不需要单独设计散热器。

## 4 结论

文中分析了取能线圈的原理,得出了输出功率与各参数之间的关系,基于此设计了在整流器直流侧进行磁通补偿的电路,不仅避免了铁心饱和,而且以简单的电路实现了对线圈输出能量的控制。用1.5 cm<sup>2</sup>截面积的铁心,实现了一次电流范围35~120 A的可靠取能,且不需要另加散热结构。经过研究,得出以下结论:

1)取能线圈的实际输出功率随铁心截面积、匝数、一次电流幅值、铁心磁导率的增加而增加,随铁心直径的增加而减小,随负载电阻的增加先增加后减小;

2)用充电二极管与迟滞比较配合,可以让整流器处于间歇性输出状态,一次电流越大,输出时间越短,从而达到在较大电流下控制线圈输出功率的目的;

3)文中所设计的取能线圈以很小的截面积实现了很大的一次电流变化范围下的稳定的小功率取能,具有发热少、体积小、电路简单可靠的优点,不仅可用在高压电容器在线监测的场景中,在智能传感器、在线监测等领域有着很好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 赵东生,黄缙华,尚观远,等. 并联电容器母线电流在线监测传感器关键技术研究[J]. 电工技术,2022(16):33-36.  
ZHAO Dongsheng, HUANG Jinhua, SHANG Guanyuan, et al. Research on key technology of on-line monitoring sensor for shunt capacitor bus current[J]. Electric Engineering, 2022(16): 33-36.
- [2] 刘宏伟,张传辉. 电力电缆无线监测网络基于磁场取能的供电电源设计[J]. 高电压技术,2020,46(3):971-978.  
LIU Hongwei, ZHANG Chuanhui. Power supply of wireless monitoring network for power cable based on magnetic field energy harvested[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 971-978.
- [3] 王德贺,张英,李仙琪,等. 基于电磁感应的电缆线路在线监测取电电源设计[J]. 科技创新与应用,2022,12(4):100-102.  
WANG Dehe, ZHANG Ying, LI Xianqi, et al. Design of power supply for on-line monitoring of cable lines based on electromagnetic induction[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(4): 100-102.
- [4] KUMAR B R, MOHAPATRA A, CHAKRABARTI S, et al. Phase angle - based fault detection and classification for protection of transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021(133): 107258.
- [5] 成林,陶佳鑫,吴涛,等. 330 kV GIS隔离开关操作产生的VFTO电磁骚扰特性研究[J]. 电网与清洁能源,2023,39(5):11-19.  
CHENG Lin, TAO Jiabin, WU Tao, et al. Research on VFTO electromagnetic disturbance characteristics of 330 kV GIS disconnecter operation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(5): 11-19.
- [6] ZENG Xiangfeng, LI Baojie, LI Hongjie, et al. Non-invasive energy harvesting for wireless sensors from electromagnetic fields around 10 kV three-core power cables[C]//2017 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Xi'an: IEEE, 2017: 536-539.
- [7] 陈龙瑾,邢菁,吴达雷,等. 基于支持向量机的多回路关口电能表在线监测方法研究[J]. 电测与仪表,2023,60(10):194-200.  
CHEN Longjin, XING Jing, WU Dalei, et al. Research on on-line monitoring method of multi-loop gateway electricity meter based on SVM[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 194-200.
- [8] 公东生,蔡富东. 输电线路在线监测装置供电电源的研究与设计[J]. 电子质量,2022(6):205-208.  
GONG Dongsheng, CAI Fudong. Research and design of power supply for on-line monitoring device of transmission line[J]. Electronics Quality, 2022(6): 205-208.
- [9] 陈一惊,刘坤雄,张小庆,等. 基于电容电流的谐波电压在线监测系统研制[J]. 智慧电力,2021,49(6):67-74.  
CHEN Yicong, LIU Kunxiong, ZHANG Xiaoqing, et al. Development of voltage harmonics online measurement system based on capacitor current[J]. Smart Power, 2021, 49(6): 67-74.
- [10] 刘宏伟,郑遵国,李玉付,等. 一种基于交流电场感应的取能电源设计[J]. 电力工程技术,2023,42(6):214-222.  
LIU Hongwei, ZHENG Zunguo, LI Yufu, et al. Optimal design of energy harvesting power supply based on AC electric field induction[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 214-222.
- [11] DI Yunpeng, GAO Yincheng, WANG Yanchao, et al. Design of draw-out power supply for on-line monitoring system of three-core power cables[C]//2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). Chengdu: IEEE, 2021: 616-620.
- [12] 赖国书. 数据驱动的电能表运行状态在线监测方法[J]. 电测与仪表,2023,60(4):193-200.  
LAI Guoshu. Data-driven online monitoring method of running state of electricity meter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4): 193-200.
- [13] 兰天,蓝元良,刘伟麟,等. 面向换流阀状态监测用传感器节点电磁取能仿真分析与设计[J]. 电网技术,2022,46(4):1503-1510.  
LAN Tian, LAN Yuanliang, LIU Weilin, et al. Design and analysis of electromagnetic induction based energy harvester for smart sensor node employed in HVDC converter[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1503-1510.
- [14] 柳百毅,陈为,李榜,等. 基于感应取能的微功率能量收集器[J]. 中国电机工程学报,2020,40(5):1474-1484.  
LIU Baiyi, CHEN Wei, LI Bang, et al. Micro-power energy harvester based on electromagnetic induction[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1474-1484.
- [15] 南保峰,卢雨欣,孙廷玺,等. 基于三芯电缆自取能技术的热状态评估系统研制[J]. 智慧电力,2020,48(11):103-107.  
NAN Baofeng, LU Yuxin, SUN Tingxi, et al. Development of thermal condition evaluation system based on energy self-

- harvesting technique for three-core power cables[J]. Smart Power, 2020,48(11):103-107.
- [16] 谭悦.配电网线路在线监测设备轻型感应取能电源研究[D].重庆:重庆理工大学,2022.  
TAN Yue. Research on light induction energy-taking power supply for on-line monitoring equipment of distribution network[D]. Chongqing: Master's Dissertation of Chongqing University of Technology, 2022.
- [17] 同聪维,胡治龙,张腾,等.一种用于高压换流阀晶闸管TCU的取能装置关键技术研究[J].高压电器,2021,57(1):89-93.  
TONG Congwei, HU Zhilong, ZHANG Teng, et al. Study on key technology of energy acquisition device for high voltage converter valve thyristor TCU[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 89-93.
- [18] 张鹏,王玮,徐丙垠,等.基于自适应功率输出控制的电流互感器取能电源设计方法[J].电力系统自动化,2020,44(3):194-200.  
ZHANG Peng, WANG Wei, XU Bingyin, et al. Design method of energy-gaining power supply for current transformer based on self-adaptive power output control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 194-200.
- [19] 张璐璐,李斌,权超,等.基于磁滞特性的自取电电源取能线圈匝数研究[J].电力工程技术,2019,38(1):119-125.  
ZHANG Lulu, LI Bin, QUAN Chao, et al. The number of coil turns for self-powered supply on transmission lines based on hysteresis characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 119-125.
- [20] 黄继盛,贾洪瑞,刘学忠,等.基于高压陶瓷电容的自取能与暂态电压监测一体化传感器设计与特性研究[J].电瓷避雷器,2021(3):86-92.  
HUANG Jisheng, JIA Hongrui, LIU Xuezhong, et al. Characteristics of an integrated sensor with self-extraction energy and transient voltage monitoring based on HV ceramic capacitor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(3):86-92.
- [21] 吉喆.基于环境能量采集的传感器自供电技术研究[D].南昌:南昌大学,2021.  
JI Zhe. Research of self-powered technology on Sensor based on ambient energy harvesting[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.
- [22] 张焯辉,董琪琪,方杰,等.一种零磁通电流传感器适配装置的研制与应用[J].电测与仪表,2023,60(3):195-200.  
ZHANG Huanghui, DONG Qiqi, FANG Jie, et al. Development and application of a zero-flux current sensor adaptive device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 195-200.
- [23] 周楠.环网柜用取能相零序电压传感器模块化设计[J].数字通信世界,2020(9):91-92.  
ZHOU Nan. Modular design of energy-taking phase zero-sequence voltage sensor for network cabinet[J]. Digital Communication World, 2020(9):91-92.
- [24] 汤蕴珍,史乃.电机学[M].北京:机械工业出版社,2001.  
TANG Yunqiu, SHI Nai. Electrical engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [25] XIE Jia, YANG Haitao, DING Guocheng, et al. Wireless monitoring system design for high voltage bushing in power substation[C]// 2022 International Conference on Power Energy Systems and Applications(ICoPESA). Guangzhou: IEEE, 2022: 213-218.
- [26] 朱长银,常远,赵玉灿,等.750 kV串联电容补偿系统集中电子式互感器测量系统设计[J].电气技术,2022,23(5):90-94.  
ZHU Changyin, CHANG Yuan, ZHAO Yucan, et al. Design of centralized instrument transformer measure system in 750 kV series capacitor compensation system[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(5): 90-94.
- [27] 刘俭,姜春阳,周峰,等.弱输出电压传感器误差校验系统研制[J].电测与仪表,2023,60(2):154-158.  
LIU Jian, JIANG Chunyang, ZHOU Feng, et al. Development of error calibration system for weak output voltage sensor[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 154-158.
- 徐辉(1981—),男,高级工程师,研究方向为交直流特高压运检技术。  
雷战斐(1991—),男,工程师,研究方向为交直流特高压运检技术。  
史磊(1987—),男,高级工程师,长期从事交直流特高压运检技术。  
赵欣洋(1985—),男,高级工程师,长期从事超特高压直流运检。  
林丽妲(1988—),女,工程师,长期从事电力电容器技术研究工作(通信作者)(E-mail:linlida\_2008@163.com)。  
柴斌(1990—),男,工程师,研究方向为交直流特高压运检技术。  
秦有苏(1985—),男,高级工程师,研究方向为交直流特高压运检技术。