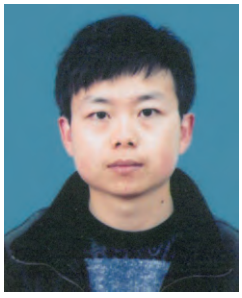
电缆温度监测装置的取能电源设计与实现

电缆温度监测对于电缆安全运行具有重要意义，受电缆结构和工作环境限制，监测装置采用电流互感器取能供电方式更为可行。给出了取能电源的总体结构以及各模块的设计与实现方法，应用电磁场原理分析了取能线圈的工作原理。取能电源的试验表明，该方法设计和实现的取能电源能够可靠工作，解决了温度监测装置的供电问题。

何宁辉　郝金鹏　沙伟燕／国网宁夏电力公司电力科学研究院
顾善匀　张淮清／重庆大学电气工程学院



何宁辉／工程师

关键词／Keywords
电缆·
供电电源·
互感器取能·

0　引言

电缆温度在线监测对于系统运行十分重要[1-2]，但由于其节点多、分布广、环境条件恶劣以及监测设备安装困难等原因，使监测设备采用电池供电方式不能得到较好的适用。因此，迫切需要一种稳定可靠、安装方便且免维护的供电电源解决方案。现有的适用于输电线路的监测设备供电方法（如太阳能、电容分压[3]等）又难以移植到电缆监测系统供电中。其他新颖供电方式（如激光、微波和超声波[4]）也面临造价高、转换效率低或电磁干扰的问题。

鉴于电缆一般敷设于地下，具有较厚的绝缘层保护，因此不能采用太阳能和电容分压方式。但当电缆工作在单相模式下时，其内导体上的交变电流将在电缆外部空间激发较强的准静态磁场，因而可基于电磁感应原理，利用电缆外部放置的线圈感应出电压并取能，类似于电流互感器原理，可称为电流互感器模式[5-9]。为提高感应电压，线圈通常带有铁心，其优点是结构简单，但也存在小电流有死区、大电流易饱和以及过电流时感应过电压等问题。尽管如此，相比于其他供能方式，电流互感器取能方式更为可行。因此，本文采用电流互感器方式实现电缆温度监测装置的供能。

1　取能电源总体设计

取能电源整体结构如图1所示，电缆穿过带有铁心的取能线圈（实际可直接采用电流互感器），由电磁感应原理可知取能线圈两端将感应出电动势，再经过整流、滤波输出直流电压，最后再采用DC－DC稳压模块得到5 V电压输出。

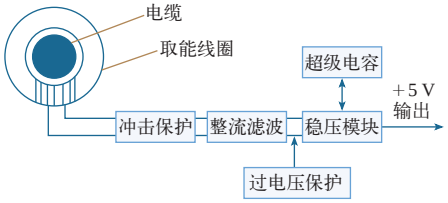


图1　供电电源整体结构框图

针对电流互感器小电流存在死区的问题，即一次电流较小，输出电压低且未能满足供电要求，提出采用超级电容储能作为监测系统的备用供电，以便在感应取电不足的场合使用；对于大电流造成的饱和问题，即一次电流较大，输出电压高，提出采用DC－DC稳压电路来保证5 V输出电压的稳定；对于一次侧发生短路故障而造成的过电流问题，二次侧将感应出冲击过电压，因而设计了冲击保护电路，以保障后端模块的安全。

2　取能线圈工作原理

取能线圈的原理是基于电磁感应实现的，下面以某ZRYJV型35 kV高压单芯电缆为例来进行详细的分析说明。电缆的结构尺寸如下：导体标称截面积240 mm^2，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

绝缘层标称厚度19 mm，铅层厚度为3 mm，外护套厚度4.5 mm，电缆载有电流100 A。为分析电缆外表面的空间磁场，本文采用ANSYS公司的Maxwell 2D 软件进行仿真计算。电缆截面的磁场分布如图2所示，由图2可见，由于单芯电缆结构的对称性，使磁场分布也具有轴对称性，磁感应强度为毫特斯控量级。最大场强集中在导体外表面附近，电缆外表面磁场明显减小。

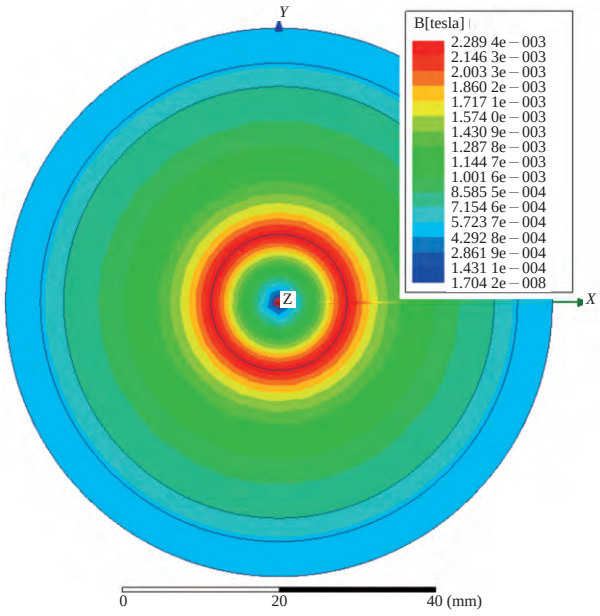


图2　电缆截面磁感应强度分布

为进一步分析磁场变化情况，给出了沿半径方向的磁场变化曲线，如图3所示。

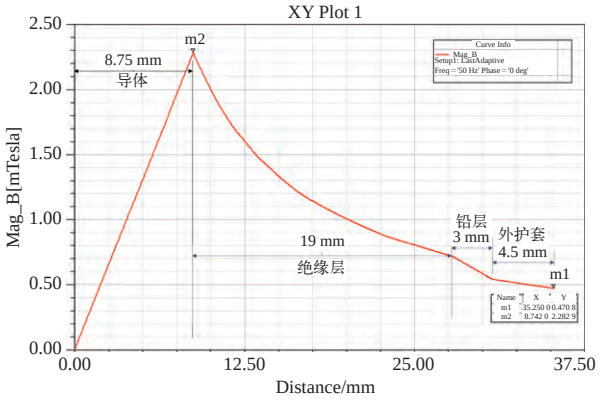


图3　沿半径方向的磁感应强度曲线

由图3可得如下结论：①在导体区域，磁场随半径线性增加，与载直流圆柱导体磁场的理论解$B \propto r$一致，主要由于电缆导体为多芯导线结构，虽载有50 Hz交变电流，但趋肤效应不明显，电流分布与直流时的均匀分布相似；②在绝缘层内，磁场B与r成反比，与理论分析相吻合；③在铅层和外护套层内，由于铅层的导电性，在交变磁场下感应了涡流并产生去磁效应，使磁场较反比时下降更快，也体现出铅层一定的屏蔽效果；④沿半径方向，磁场最大值出现在内导体表面，具体为2.282 9 mT，最小值则在电缆外表面，数值为0.470 8 mT。电缆外部空间磁场将随半径的增加进一步减小。

在取能线圈设计时，如采用空心方式，线圈截面积取为2 cm×3 cm＝6 cm^2，匝数为100，感应电动势$\dot{\varepsilon} = j\omega \dot{B} NS$，线圈内磁场取最大值（即取电缆表面磁场值0.470 8 mT），则对应开路电压大小为8.87 mV，可见感应电压过小；为了保证后续模块正常工作并实现取能，感应电压应大于6 V。因此，需采用带铁心线圈，如铁心相对磁导率为1 000，则感应电压理论值达8.87 V。另外，考虑到安装的便利性，铁心应采用开口式结构，以便电缆穿入。本文研究中具体采用了穿心开合式电流互感器。

3　整流、稳压及保护电路设计

取能线圈后续电路包括冲击保护、整流滤波、过电压保护以及稳压模块，具体如图4所示。

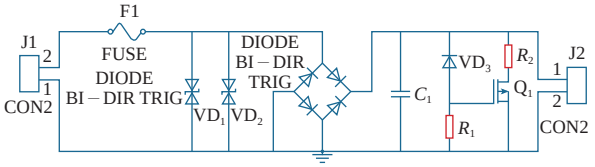


图4　冲击保护、整流滤波、过电压保护模块

其中，自恢复保险F1起冲击电流保护作用，当发生短路故障而电流过大时，保险F1熔断。双向瞬变电压抑制二极管（TVS管）VD_1、VD_2起冲击电压保护作用，正常状态下VD_1、VD_2不工作，当二次侧感应出较高冲击电压时，VD_1、VD_2反向击穿，将两端电压钳位在一定的数值上，保护后续电路不被瞬间冲击电压损坏。

整流电路选用二极管桥式整流电路。C_1为滤波

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

电容，考虑二次侧感应电压波形可能因磁心饱和而出现较大失真，C_1取为3 300 μF大电容以平滑波形纹波。

单向瞬变电压抑制二极管VD_3、电阻R_1、R_2和MOS管VQ_1共同构成过电压保护电路。考虑到后续DC－DC模块输入电压范围上限为40 V，因此，当输入电压大于40 V时，单向瞬变电压抑制二极管VD_3反向击穿，R_1上有电流流过并产生压降，VQ_1导通，电阻R_2构成放电回路，从而实现过电压保护功能。

稳压电路采用DC－DC模块，相对于线性稳压具有效率高、体积小的优势。即使在输入输出电压降很大时，效率也不会降低，而且电源不需要大的散热器。本文选用模块的输入范围为7～40 V，输出为5 V，原理如图5所示。

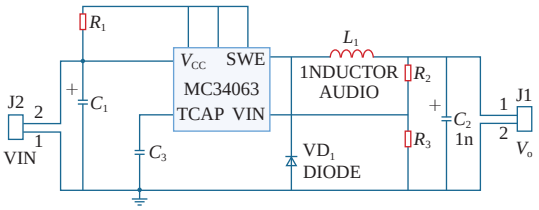


图5　DC－DC模块原理

稳压模块选用MC34063芯片做降压变换器，它包含了DC－DC变换器的控制电路，主要构成部分是具有温度补偿的电压源、占空比可控的振荡器、驱动器、比较器、大电流输出开关电路和R－S触发器，其内部结构如图6所示。

MC34063通过外接电阻R_1、R_2来监视输出电

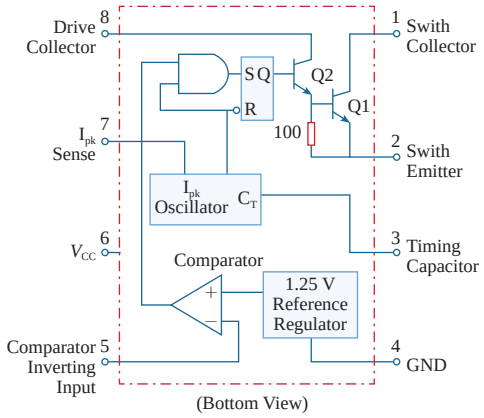


图6　MC34063芯片内部结构

压，芯片内部基准电压为1.25 V。当输出电压低于基准电压时，芯片内部比较器输出跳变电压，内部触发器S脚为高电平；当振荡器向电容充电时，R脚为高电平，使得触发器Q端为高电平，从而使输出的晶体管导通，进而有输入电压V_{in}向输出滤波器电容C_2充电以提高输出电压V_o，达到自动控制V_o稳定的作用。

4　取能电源试验

本文选用的测试设备主要有大电流发生器SLQ－500 A、示波器UTD1025C、穿心开合式电流互感器KHCT911L－600 A/5 A、DC－DC模块以及0.33 F、5.5 V的超级电容。为减小导线电流，一次侧互感器穿心导线取为10匝，输入总电流为70 A，DC－DC模块输出空载。测试电路示意和实物如图7和图8所示。

图7　取能电源测试电路

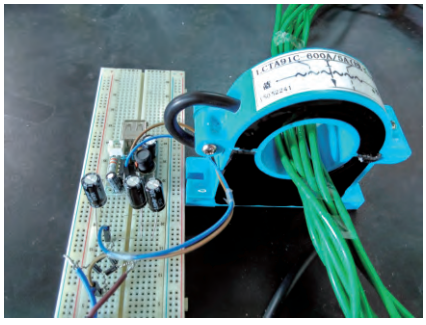


图8　取能电源实物

电流互感器输出波形如图9所示；桥式整流电路输出波形如图10所示，经大电容滤波后，输出电压为8.2～8.6 V；DC－DC稳压后的空载输出波形如图11所示。

由图11可知，电流互感器工作良好，产生的感应电压足够后续电路使用。经DC－DC稳压后电路输出稳定的＋5 V左右电压，满足5 V用电系统的供电要求，并可对超级电容进行充电。

在带有负载的情况下，控制一次侧输入总电

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

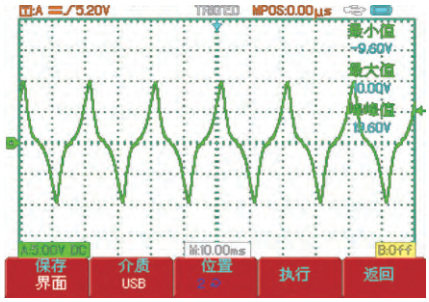


图9 一次侧输入70 A时电流互感器输出波形

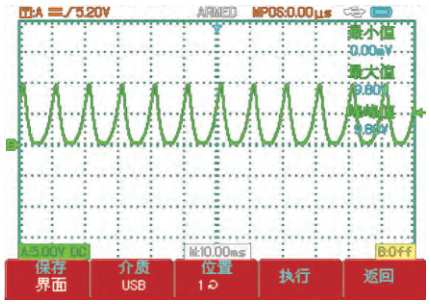


图10 桥式整流电路输出波形

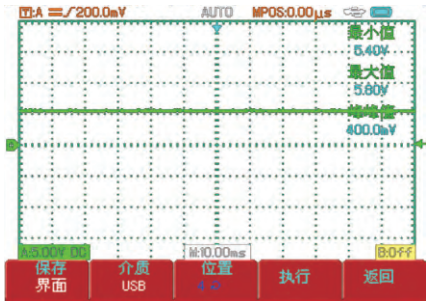


图11 DC－DC空载输出波形

流为70 A，测得不同负载电阻*R*下输出电压有效值*U*和输出功率*P*，其关系如下表所示。

表 取能电源输出电压、功率与负载的关系

U/V	*P*/MW	*R*/Ω
4.6	450.2	47
4.8	307.2	75
5.0	250.0	100
5.6	156.8	200
5.8	122.3	275
5.8	71.5	470
5.8	42.0	800
5.8	33.6	1 000

5 结束语

1）对于单相运行的交流电缆，可用电流互感器方式从电缆外部取能。为提高线圈感应电压，可用含铁心的线圈，同时考虑到安装的便利性，论文提出采用穿心开合式的电流互感器。

2）稳压电路采用DC－DC模块，相对于线性稳压，即使在输入输出电压降很大时，仍保持高效率；而且电源不需要大的散热器，具有体积小的优势。

3）取能电源的试验表明：本文设计和实现的取能电源能够可靠工作，具有一定的带载能力，可解决电缆温度监测装置的供电问题。

参考文献

[1] 韩筱慧．电力电缆中间接头温度在线监测系统的研究 [D]．北京：华北电力大学，2012．

[2] 孙静，赵子玉．电力电缆温度实时在线监测 [J]．电线电缆，2011 (1)：40-42，46．

[3] 俞登科，余向森，许金彤．一种应用于输电线路监控系统的太阳能供电系统 [J]．华东电力，2011 (8)：1349-1352．

[4] 李小斌．高压输电线路远程监测研究 [D]．西安：西北工业大学，2007．

[5] 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]．重庆：重庆大学，2014．

[6] 鲁帆，周健瑶，赵行，等．结合超级电容与锂电池的CT取能电源研究 [J]．电测与仪表，2015 (6)：89-95，112．

[7] 王智博．电流互感器取电电源的研究与设计 [D]．杭州：浙江大学，2015．

[8] 李俊．基于无线传感网的电缆接头温度在线监测系统 [D]．南京：南京信息工程大学，2014．

[9] 张露．电力电缆测温系统取能电源设计研究 [D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2012．

（收稿日期：2015－10－20）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net