

电子式互感器工作电源及唤醒机制的实现

季龙三¹, 侯铁信², 卜正良², 舒乃秋³, 康 兵³

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院, 广东 广州 510663;

2. 武汉国测科技股份有限公司, 湖北 武汉 430000; 3. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 提出将高压悬浮取能工作电源结合电源管理机制来为配网系统一体化设备供能。该工作电源采用高压悬浮双边取能, 保证了一体化设备核心模块合并单元能在全相、非全相运行时可靠工作。在分压电容后端串联补偿电抗器和添设过电压保护电路来消除负荷波动影响和解决过电压防护问题。电源管理模块通过对高压取能模块与后备电源的管理控制, 实现二者的配合工作, 为高压侧有源设备提供稳定可靠的电源。最后给出了电源控制模块的唤醒机制逻辑设计和备用电源选型及容量设计。

关键词: 电子式互感器; 工作电源; 分压电容; 机制; 储能; 过电压保护

中图分类号: TM 45

文献标识码: B

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.026

0 引言

随着我国超、特高压电网的建设和电力体制改革的不断深化, 新一代电力网络——坚强的智能电网已经初步形成, 这标志着我国电网发展将朝着信息化、数字化、自动化、集成化方向前进。新型的电子式互感器具有动态范围大、频带宽、体积小、测量范围大、抗电磁干扰性强等优点, 适应电力系统的发展要求, 符合智能配网一体化概念。本文通过对基于电子式互感器技术的集数据采集与合并配电网一体化装置的介绍, 阐述一种新型高压供能方式以弥补现存取能方式的缺陷, 提高设备取能模块的可靠性、安全性与经济性。

1 装置整体方案

装置分为低压与高压两部分, 高压部分主要完成实时运行电气量检测、电气信号数据整合、操作控制命令执行功能, 低压部分主要实现保护、测控和计量数据显示与远传等功能。

低压侧设计部分主要实现状态监测、电能质量监控、测量、控制与保护等功能。由于设计方案是以配网自动化概念为核心, 在数据传输、站内通信、远程控制时采用国际电工委员会制定的 IEC61850 统一标准, 解决了设备之间的互操作性和无缝集成等问题, 使通信可靠性得到提高。

高压部分包含了电压/电流传感模块、数据采集模块、取能模块与合并单元。电压/电流传感模块选用有源式电子式互感器作为传感头来检测线路电气量, 采集所得的模拟信号进入数据采集模块进行调理、量化, 再根据 IEC60044 协议通过 Manchester 编码与光电转换, 实现数据采集模块与合并单元之间的光通信。三相所有保护和计量的测量信号均汇总到

B 相内的合并单元后, 合并单元对数据进行串并转换处理并打包成标准 IEC61850 9-1 或 IEC61850 9-2 格式的报文, 最后发送给低压侧的智能保护单元或测控单元。同时合并单元还通过光纤同步信号完成对其他相上的高压电位计量、保护数据模块进行采样的同步控制。同时, 为保障高压侧有源设备的正常工作, 需设计相应的取能模块来解决一体化装置高压侧供电问题。因此, 设计合理、科学的工作电源模块成为一体化设备研究中的难点和关键技术。智能集成终端原理图如图 1 所示。

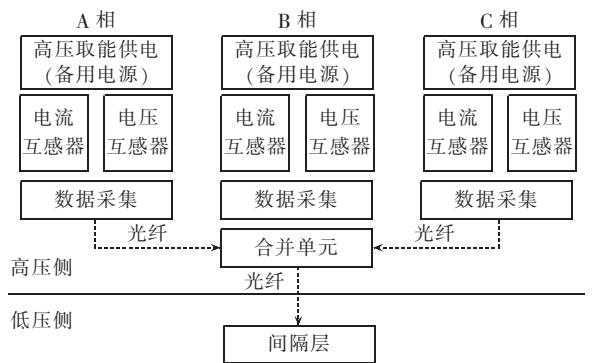


图 1 智能集成终端原理图

Fig.1 Schematic diagram of intelligent integrated terminal

2 高压悬浮取能

2.1 现有取能方案

传统的高压供能方式有电流互感器(TA)供能、激光供能与太阳能供能。

利用 TA 从输电线上取能的基本工作原理是利用特制 TA 从母线上感应电压, 通过整流、滤波、稳压等后续电路处理后, 给高压侧电子电路提供所需的电源。在设计铁芯线圈感应交流电能为二次侧供能时, 应使其尽量工作在饱和段, 这样即使感应电压的瞬时峰值会随一次导线电流的增加而增加, 感应电压的

当 $L_1 = \frac{1}{\omega^2(C_1 + C_2)}$ 时, $I = 0$, 则二次电压与二次电流无关, 只与一次电容分压比有关, 这样就解决了分得电压受负载大小影响的问题。

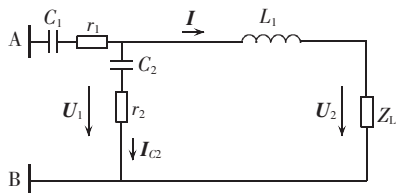


图 5 电容分压器电路
Fig.5 Circuit of capacitive voltage divider

由于高压线路雷击事故和一些空载变压器的投切操作, 会对线路产生雷击过电压和操作过电压, 因此在高压工作电源的设计上, 需添置过电压保护元器件。如图 4 所示, 选择气体放电管、压敏电阻 (R_{V1}, R_{V2}) 和瞬态抑制二极管 (V_{D1}) 三者相互配合来防止过电压。3 种防雷元器件中, 气体放电管属于开关型元器件, 三者的性能比较如表 1 所示。

表 1 防雷元器件性能差异
Tab.1 Comparison of performance among different anti-lightning components

保护元件	性能				
	响应时间	耐流能力	残压	寄生电容	适用范围
气体放电管	最慢	最强	最高	最小	第 1、2 级保护
压敏电阻	较快	强	较高	最小	第 1、2 级保护
瞬态抑制二极管	快	较强	低	较小	第 2、3 级保护

因此将瞬态抑制二极管作为第 3 级保护, 压敏电阻 R_{V2} 作为第 2 级保护, 气体放电管作为第 1 级保护。由于瞬态抑制二极管和压敏电阻响应时间快、流通量小, 为防止耐流能力较低的瞬态抑制二极管和压敏电阻单独承担巨大的冲击能量而损坏, 将在瞬态抑制二极管、压敏电压 R_{V2} 、气体放电管之间添加隔离单元, 使 3 个保护元器件按顺序放电、导通。隔离单元可为电阻、电容、电感或它们的组合网络, 图 4 中将 AC/DC 转换模块和线绕电阻 R_1 作为三者之间的隔离单元。同时, 压敏电阻 R_{V2} 前端串联线绕电阻 R_1 可在 R_{V2} 短路失效时将短路电路断开。最后, 由于压敏电阻寄生电容较大, 在正常工作时会产生一定的漏电流, 当反复导通几次后, 漏电流增大会致使压敏电阻爆炸造成短路失效; 而气体放电管寄生电容小, 但自身确存在续流问题。因此, 通过气体放电管与压敏电压 R_{V1} 串联设计, 同时解决了压敏电阻漏电流过大和气体放电管续流问题。

4 电源管理模块

4.1 电源管理模块设计原理

为解决断电或其他事故引起的电压消失致使取能中断、高压侧数据采集模块无法正常工作的问题,

添加一套储能元件作为后备电源, 当取能中断时, 由后备储能电源为高压侧电路板供电。电源管理模块正是通过对线路取能与后备电源的管理控制, 来实现线路取能与后备电源之间相互配合工作, 为高压侧有源设备提供稳定、可靠电源, 满足各项指标要求。其基本原理如图 6 所示。

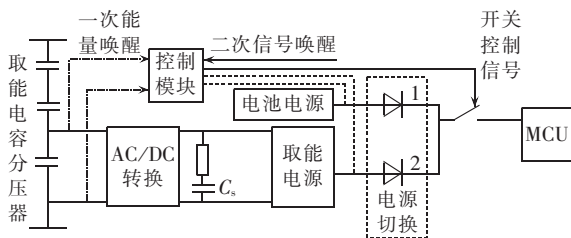


图 6 电源管理原理图
Fig.6 Schematic diagram of power supply management

储能元件由超级电容 C_s 和超能电池 (将在 4.3 节分析) 两部分组成。超级电容作为主要储能元件, 放置在高压侧, 通过 AC/DC 转换装置与电容分压器中的低压电容进行并联取能。当线路正常运行时, 电路利用电容分压悬浮取电, 不仅为数据采集模块进行供电, 同时也为超级电容进行充电。超能电池作为后备储能元件, 其作用是当超级电容能量耗尽时, 为高压侧电路板供电。

将 2 个二极管并联作为电源切换电路设计, 通过电容分压、AC/DC 转换后, 设计取能电压为 5 V, 可将电池电压设计为 3.6 V。当取能回路正常工作时, 由于取能电压高于电池电压, 则二极管 2 处于优先导通状态, 由取能电源供电; 当电容分压器失压, 悬浮取能中断后, 取能电压达不到电路最低工作电压, 则二极管 1 优先导通, 由电池电源供电。

智能控制模块控制电源切换电路与微控制单元 (MCU) 之间的开关, 电源开关主要实现电路板唤醒状态与休眠状态之间的转换。当开关处于闭合状态时, 电路板处于正常工作唤醒状态; 当开关处于断开状态时, 电路板处于休眠状态, 此时备用电源只为智能控制模块供电, 使得电路板可随时唤醒。控制开关可选用模拟电子开关, 由于模拟电子开关是利用二极管饱和导通原理, 因此需要考虑二极管饱和压降带来的影响。控制模块通过一次能量唤醒与二次信号唤醒来闭合处于断开状态的开关, 此方案不仅可根据需要提前为电路板供电, 也可由电容分压器电压信号来实现控制模块自动唤醒, 提高电路板正常工作冗余度, 从而实现 MCU 智能供电方式。

4.2 唤醒机制逻辑设计

国家电网《智能变电站测控单元技术规范》4.1.1 条提出, 测控装置应具备高可靠性, 装置 GOOSE 信息处理时延应小于 1ms。首次合闸前由于一体化装置处于休眠状态, 一次电压取能方案需要对采集电能

进行整流处理,供电电能由于整流原理将造成前半周期波头丢失无法供能,会出现供能延迟现象,无法满足《智能变电站测控单元技术规范》对信息传输延时要求。因此,需要为一体化装置设计二次唤醒信号接口,在首次合闸前,通过取得测控保护单元的唤醒信号来提前启动后备电源使一体化装置带电,此时就可实现合闸后零秒传输延时。

线路工作状态与智能控制模块工作状态关系如下。

a. 当设备处于待机状态时,智能控制模块断开开关启动休眠机制,使高压电路板处于最低功耗状态,避免过早消耗超级电容与超能电池能量。

b. 当线路正常状态运行时,超级电容处于充电状态,由高压侧悬浮电压取能供电。

c. 当线路出现事故失压时,高压电路板无法进行悬浮取能,则由后备电源供电,使其延时工作 10~20 s,提供足够的保护反应时间和重合闸时间;若在 10~20 s 内线电压仍然未恢复,则控制芯片进入休眠模式,由后备电源提供 μA 级电流维持。

d. 当线路检修后再次准备投运时,可以由二次信号唤醒机制启动控制开关,使后备电源提前 3~5 s 为设备供电,避免出现保护盲区。同时为防止线路首次合闸时再次出现线路失压造成取能中断,需考虑状态 c,备用电源增加 10~25 s 工作时间,共计 15~25 s。

控制模块可通过逻辑门电路设计,选择低电平为有效电平。由于一次能量唤醒为连续信号,则当开关控制模块接受一次能量唤醒低电平信号时,开关为闭合状态。当电容分压器失压时,一次能量唤醒信号从低电平转换为高电平,控制模块为开关提供 10~20 s 延时,由后备电源供电,若此期间控制模块始终无法再次获得一次能量唤醒低电平信号,则开关断开,电路板启动休眠机制,等待二次信号唤醒。

二次信号唤醒来源于二次侧保护测控装置,此信号使开关闭合并延时 15~25 s。若此期间无法获得一次能量信号,则开关断开。

此套设计最大特点在于减小启动电流和启动时间,增加母线动态范围,并消除首次合闸带点到电源正常启动的时间延迟,避免传感器丢失合闸瞬间的暂态波头。

4.3 备用电源的选型及其容量设计

4.3.1 备用电源选型设计

目前市场上有多种储能元件可应用于集成电路,主要考虑的储能元件有一次电池与可再充储能元件静电电容、超级电容、二次电池。各种储能元件由于自身实现原理不同造成性能差异的不同(如表 2 所示),因此适用环境也不尽相同^[3]。

在备用电源的选择上,必须考虑备用电源的工作

表 2 各储能元件特性比较
Tab.2 Comparison of performance among energy storage components

元件特征	静电电容	超级电容	蓄电池
放电时间/s	$10^{-6}\sim 10^{-3}$	1~30	0.3~3
充电时间/s	$10^{-6}\sim 10^{-3}$	1~30	1~5
能量密度/($\text{W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$)	<0.1	1~10	20~100
功率密度/($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$)	>10 000	1 000~2 000	50~200
循环效率/%	≈ 1.0	0.9~0.95	0.7~0.85
循环寿命/次	∞	>100 000	500~2 000

特点和性能要求。由于备用电源是在装置无法正常取能时和装置处于休眠状态时为装置提供待机能量,其电源首先必须具备一定的功率密度,保证所提供的功率水平满足电路板正常工作要求。同时,备用电源也应具备一定的能量密度,需为电路板提供长时间的休眠待机电能。另外,由于备用电源是密封于装置内部置于线路高压侧,不能取出更换或维护,因此需具有使用寿命长、工作温度范围宽的特点。最后,备用电源的充放电性能要好,需具备稳定、安全、可靠性强的特点。

鉴于以上分析和各储能元件的性能差异,单一的储能元件很难满足其要求。因此,本文选择超级电容与一次电池复合电源方案,使各储能元件相互配合满足要求。

4.3.2 超级电容误差分析

对超级电容进行误差分析,结论如下。

a. 当多个超级电容串联设计时,由于各个电容工艺水平不一致,即使每个超级电容额定容量相同,也会存在容量偏差问题,最严重时可使超级电容组储能能力下降 27%。如果经过电压均衡处理,可以将原储能能力提高 10%,但由于其控制复杂、成本昂贵、技术不成熟,采用额外增加电容来提高储能能力比较实际^[6]。

b. 由于超级电容工作原理,超级电容能实现快速充电模式,充电时间为 1~30 s。但随着充电电流的增加,受超级电容等效串联电阻的影响,端电压的突变幅度增加,有效储能降低,并且电容容量降低。

c. 由于超级电容中存在并联等效电阻,因此超级电容自身存在漏电流,使其储存电能过早消耗。

d. 超级电容端电压波动严重,当超级电容释放 50% 的储能能量时,端电压下降到初始电压的 70%。

4.3.3 超级电容最长工作时间

超级电容工作于线路出现故障且继保装置仍需正常工作的情况下。在计算最长工作时间时,需要考虑保护动作时间、断路器动作时间和重合闸动作时限问题。在相间三段式电流保护中,需要考虑其限时电流速断保护和定时限过电流保护。限时电流速断保护的最大时限是当校验灵敏系数不能满足要求

时,需考虑进一步延伸限时电流速断保护的保护区,使之与下一条线路的限时电流速断相配合,动作时限 $t_2''=t_1''+\Delta t$, 约为 2 s, t_1'' 为本线路电流保护的整定时间, t_2'' 为下一条线路电流保护的整定时间, Δt 通常为 0.5 s。定时限过流保护的最大整定时限也约为 2 s。非故障状态时,断路器跳闸灭弧时间为 50 ms,故障状态断路器跳闸灭弧时间约为 200~300 ms。考虑一定冗余度后,设保护时间与断路器动作时间之和 $t_p=3$ s。由于断路器跳闸后进行一次重合闸,需经过一段灭弧时间和绝缘材料恢复时间,根据我国一些电力系统的运行经验,如果第 1 次重合闸恢复及动作时间整定为 0.3~0.5 s,一次重合闸成功率较低,而采用 1 s 左右的重合闸恢复及动作时间则较为合适;当断路器进行二次重合闸时,则需增加重合闸恢复时间,将第 2 次重合闸恢复及动作时间整定为 5 s 左右的时间较为合适。

同时,当线路检修时,备用电源需为设备提供待机电流,其待机时间设置为 $T_b=24$ h。

最后,考虑断路器首次合闸前设备需提前带电,因此备用电源最长提前工作时间为 $T_0=5$ s。

备用电源工作时间分布见图 7,其中, $T_a=15$ s,为线路失压到断路器最终跳闸时间; $T_b=24$ h,为线路检修时间; $T_c=15$ s,为断路器首次合闸到最终跳闸时间; $T_0=5$ s,为备用电源提前唤醒时间; T_1 为一次重合闸时间, T_2 为二次重合闸时间; I_1 为高压侧电路板工作电流; I_2 为高压侧电路板休眠待机电流。

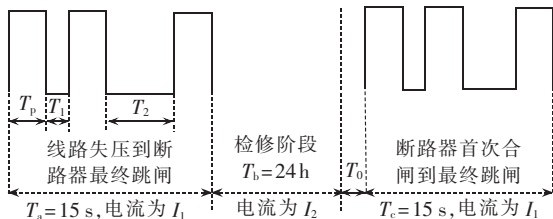


图 7 备用电源工作时间分布

Fig.7 Distribution of working time of backup power supply

4.3.4 超级电容容量计算

由图 7 可知,备用电源工作最长时间由 T_a 、 T_b 、 T_c 和 T_0 组成。 T_a 、 T_c 、 T_0 为设备处于工作状态时间,此时设备功率消耗为 P_1 ,备用电源提供正常工作电流。 T_b 为设备处于休眠状态时间,此时设备功率消耗为 P_2 ,备用电源提供待机电流。则超级电容保持期间所需要的总能量为:

$$E_k = (T_a + T_c + T_0)P_1 + T_bP_2$$

超级电容提供的最大能量为:

$$E_d = \frac{1}{2}C(U_w^2 - U_{\min}^2)$$

其中, U_w 为设备正常工作电压(单位为 V); $U_{\min}$ 为设备截止工作电压(单位为 V)。

由 $E_k \leq E_d$ 得:

$$C \geq \frac{70P_1 + 1.152 \times 10^6 P_2}{U_w^2 - U_{\min}^2}$$

其中, C 为超级电容的标称容量,单位为 F。

超级电容器单元的额定电压范围为 2.5~2.7 V,因此单一的超级电容无法满足高压侧电路板额定电压要求,需将多个超级电容进行串联设计。当超级电容串联设计时,根据 4.3.2 节的分析,采用补偿超级电容容量方法来解决超级电容组容量偏差带来的问题。当需要容量为 C 、额定电压为 U 的超级电容组时,理论上选取 2 个额定容量 $2C$ 、额定电压为 $0.5U$ 的超级电容进行串联设计,考虑到电容器 -20% 的容量偏差,实际应选取 2 个额定容量为 $2.5C$ 、额定电压为 $0.5U$ 的超级电容来组成超级电容器。最后,考虑超级电容端电压波动影响,需要设计 DC-DC 放电路来提高超级电容利用效率。

5 结语

本文介绍了一种新型的高压取能方案,通过设计双边取能模式提高高压悬浮取能可靠性;通过设计简化电容式电压互感器提高高压取能电能质量和设计应用于高压侧的工作电源电路来提高工作电源可靠性;通过设计电源管理模块来实现高压取能与备用电源相互配合,消除取能死区与取能延迟问题。最后根据有源设备功耗大小与备用电源工作最大时间与工作环境,来设计科学合理的备用电源选型方案。

参考文献:

- [1] 刘延冰,李红斌,余春雨,等. 电子式互感器原理、技术及应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [2] 戚栋. 一种适应母线电流动态范围宽的光电式电流互感器供电电源[J]. 中国电机工程学报,2006,26(19):160-164.
QI Dong. A kind of power supply of optic-electric current transformer for accommodating wide bus dynamic current[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(19):160-164.
- [3] 曹红波,赵晨,杨洲,等. 光电互感器高压侧电路功能问题的研究[J]. 工矿自动化,2006,4(4):10-12.
CAO Hongbo,ZHAO Chen,YANG Zhou,et al. The high-voltage side circuit of optic electronic transformer[J]. Industry and Mine Automation,2006,4(4):10-12.
- [4] 卜正良,尹项根,涂光瑜. 高压电能表的研制[J]. 电力系统自动化,2006,30(19):89-93.
BU Zhengliang,YIN Xianggen,TU Guangyu. Development of HV watt-hour meter[J]. Automation of Electrical Power Systems,2006,30(19):89-93.
- [5] 刘志祥. 超级电容器相关技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2002.
LIU Zhixiang. Research on the related technique of super-capacitors[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2002.
- [6] 田华亭,张勇. 容量偏差对超级电容储能的影响及解决方案[J]. 电子元件与材料,2009,28(9):30-33.

- TIAN Huating,ZHANG Yong. Effect of capacitance deviation on the supercapacitor energy storage module and solutions [J]. Electronic Components and Materials,2009,28(9):30-33.
- [7] 李岩松,张国庆,于文斌,等. 自适应光学电流互感器[J]. 中国电机工程学报,2003,23(11):100-105.
- LI Yansong,ZHANG Guoqing,YU Wenbin,et al. Adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(11):100-105.
- [8] 易本顺,刘延冰,阮芳. 光学电流传感器现场运行性能分析[J]. 中国电机工程学报,1997,17(2):138-140.
- YI Benshun,LIU Yanbing,RUAN Fang. Field performance analysis of optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE,1997,17(2):138-140.
- [9] 纪昆,李芙英. 光电式电流互感器的实用化设计[J]. 光电工程,2002,29(2):39-41.
- JI Kun,LI Fuying. A practical design for optoelectric current transformer[J]. Opto-Electronic Engineering,2002,29(2):39-41.
- [10] 张兵锐,林文华,李芙英. 多功能电子式高压电能表的研究[J]. 电测与仪表,2003,40(1):30-32.
- ZHANG Bingrui,LIN Wenhua,LI Fuying. Study of electronic watt-hour meter in high voltage[J]. Electric Measurement and Instrument,2003,40(1):30-32.
- [11] 王少奎. 电子式电流互感器的发展现状及研究难点[J]. 变压器,2003,40(5):20-25.
- WANG Shaokui. Development difficult points and present situation of electronic current transformer[J]. Transformer,2003,40(5):20-25.
- [12] 李红斌,刘延冰,张明明. 电子式电流互感器中的关键技术[J]. 高电压技术,2004,30(10):4-6.
- LI Hongbin,LIU Yanbing,ZHANG Mingming. Key technology of electronic current transformer[J]. High Voltage Engineering,2004,30(10):4-6.
- [13] 张曦,张庆伟,张源斌. 混合式 OCT 高压侧电路的供电方式[J]. 高电压技术,2002,28(12):14-15.
- ZHANG Xi,ZHANG Qingwei,ZHANG Yuanbin. Solutions of power supplies for high voltage circuit of hybrid optical current transformer[J]. High Voltage Engineering,2002,28(12):14-15.
- [14] 刘欣,杨北革,王建,等. 新型高压电能表的研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(9):88-91.
- LIU Xin,YANG Beige,WANG Jian,et al. Study of new-style kilowatt-hour meter in high-voltage[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(9):88-91.
- [15] 钱政. 有源电子式电流互感器中高压侧电路的供能方法[J]. 高压电器,2004,40(2):135-138.
- QIAN Zheng. Power supply for high voltage circuit of active electronic current transformer[J]. High Voltage Apparatus,2004,40(2):135-138.
- [16] 李芙英,臧金奎,纪昆. 基于 DSP 的光电式高低压电能表[J]. 电力系统自动化,2002,26(2):75-77.
- LI Fuying,ZANG Jinkui,JI Kun. Design of optoelectronic multi-functional watt-hour meter using DSP [J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(2):75-77.

作者简介:

季龙三(1988-),男,湖北武汉人,硕士研究生,从事电力系统自动化、电气设备状态检测与故障诊断方面的研究(E-mail: galaxiasjs@163.com);

侯铁信(1957-),男,湖北武汉人,教授级高级工程师,主要从事电力测试、保护及自动化等方面的研究工作;

卜正良(1966-),男,浙江东阳人,高级工程师,博士,主要从事电力计量、电力测试方面的研究工作;

舒乃秋(1954-),男,湖北黄石人,教授,博士研究生导师,主要从事传感器、电力系统在线监测以及故障诊断等方面的研究工作;

康兵(1987-),男,湖北孝感人,硕士研究生,研究方向为电能质量监测与控制。

Design of power supply for electronic transformer and implementation of its awakening mechanism

JI Longsan¹, HOU Tiexin², BU Zhengliang², SHU Naiqiu³, KANG Bing³

(1. Guangdong Electric Power Design Institute of China Energy Engineering Group, Guangzhou

510663, China; 2. Wuhan Guoce Science & Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

3. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: It is proposed to combine the suspended power supply at high-voltage side with the power management mechanism in the supply of energy for the integrated devices of intelligent distribution network. The suspended power supply at high-voltage side imbibes energy from two sources to ensure the reliable operation of merging unit of the core module of integrated devices, in both complete and incomplete phase modes. A compensating reactor is connected in series with the voltage-dividing capacitor to eliminate the influence of load fluctuation and the over-voltage protection circuit is configured. The power management unit coordinates the operations of suspended power supply and backup power supply to support the reliable and stable power supply for the active devices at high-voltage side. The logic of power awakening mechanism and the type selection and capacity design of backup power supply are given.

Key words: electronic transformer; electric power supplies to apparatus; voltage-dividing capacitors; mechanisms; energy storage; overvoltage protection