

# 一种高压取电电源的研究与实现

越来越多的电子设备出现在智能电网中,用来实现测量、通信或控制功能,但其需要通过从高压母线上取电作为工作电源。为了改进电压互感器和电流互感器取电的不足,提出了一种新的电容限流降压型高压取电电路。电路由高压电容、隔离变压器一次绕组串联组成高压取电一次回路,变压器二次绕组并联分压电容和串联匹配电感来实现稳压输出。对电路各元件的参数选取进行了分析,设计了能耗型和电容限压型两种过电压保护电路,并在不同负载下对取电电路进行了实验。实验结果表明所设计的电路输出功率稳定,安全可靠。

孟庆欢<sup>1</sup> 邹林<sup>2</sup> 黄智慧<sup>1</sup> 邹积岩<sup>1</sup> 董文亮<sup>1</sup> / 1. 大连理工大学电气工程学院 2. 南方电网科学研究院

## 0 引言

智能电网是建立在集成、高速双向通信网络的基础上,通过先进的传感和测量技术、设备技术、控制方法以及决策支持系统技术的应用,实现电网的可靠、安全、经济、高效、环境友好和安全的目标<sup>[1-2]</sup>。实时监测电网运行状态是智能电网实现其功能的基础,因此需要应用大量的分布式传感和测量装置,如高压线路的覆冰监测装置、舞动监测装置以及风速风向监测装置等。由于监测装置大多安装在高压架空线的周围,而架空线又广泛分布在野外,因此,可靠、连续和安全的供电成为监测装置正常工作的关键问题。

目前,工作在高压端的电子设备供电方式主要有电流互感器取电(TA取

电)、电压互感器取电(TV取电)、新能源供电(如太阳能、风能等)、激光供电及电容串联分压取电等。TA取电是指电流互感器通过感应取电,受母线电流影响较大,当母线处于空载或者电流较小时,无法保证取电功率;而TV取电方式广泛应用于线路低压侧设备的供电,如开关柜中设备的供电,也可以通过改变安装方式为高压侧设备供电。TV取电只需要母线电压,而无须母线电流,但是目前发现的问题是TV取电易发生铁磁谐振,从而造成设备损坏甚至爆炸,且体积大、成本高;新能源供电受外界环境影响较大,不能提供连续、可靠的电源;激光供电是利用光纤将光能从低压端传送到高压端,再由光电转换器将光能转换为电能,这种供电方法成本较高,功率较小,寿命有限,使用范围也受地点限制<sup>[3]</sup>;电容式电压互感器取电是用电容串联分压并与匹配电抗器构成谐振回路,再由中压变压器进行二次降压获取电能,需要的高压元件多,体积大,成本较高。本文结合电容式电压互感器工作原理,提出了一种新的取电电路,以减少高压元件,降低成本,同时使取电装置既不受电网电流影响,又能够为负载提供一个相对稳定的供电电压。

## 1 高压取电系统整体分析

### 1.1 高压取电电路分析

电容串联分压取电原理如图1所示,输电线电压先经分压电容 $C_1$ 和 $C_2$ 串联一



孟庆欢/硕士研究生

#### 关键词/Keywords

智能电网·  
高压取电·  
分压电容·  
匹配电感·

国家自然科学基金重点项目(51337001),辽宁省博士启动基金(201501177),中央高校基本科研业务费专项资金资助(DUT12RC(3)65),国家青年科学基金(51507025)资助。

次降压,再由隔离变压器TV二次降压后为负载供电。电容限流降压取电原理如图2所示,高压电经电容限流降压后,再由与电容串联的隔离变压器TV为负载供电<sup>[4]</sup>。变压器和负载的等效阻抗称为电源的输入阻抗<sup>[5]</sup>,此输入阻抗的大小将直接影响变压器的一次电压,因此对于上述两种取电电路,变压器的输入电压受负载影响较大,而且如果变压器选取的不合适,电容限流降压型取电电路在空载或者轻载时很容易发生过电压,因此,有分压电容 $C_2$ 的串联分压取电电路更安全。

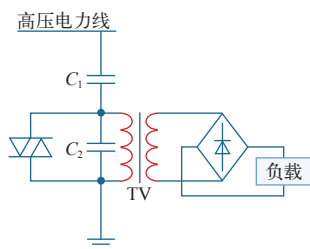


图1 电容串联分压取电电路

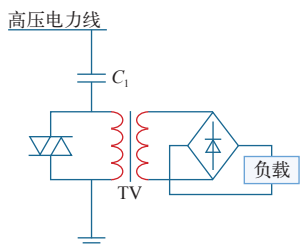


图2 电容限流降压取电原理

无论是电容串联分压取电电路,还是电容限流降压取电电路,电路电流主要由电容 $C_1$ 的漏电流决定,电容 $C_1$ 容量越大,能够输出的功率也就越大。

电容式电压互感器(CVT)能够实现其测量功能,同时还可以输出一定的功率,且在额定功率范围内测量不受负载影响,其原理如图3所示<sup>[6-7]</sup>。CVT电路之所以具有这样的特点,可用图4电路说明。在图4中,当高压臂电容 $C_1$ 、低压臂电容 $C_2$ 和补偿电抗器 $L$ 谐振时,电路能够输出一个稳定的电压值 $U_0$ , $U_0$ 是电容 $C_1$ 和 $C_2$ 串联后对电网电压 $U$ 分压、由 $C_2$ 分得的电压值,即

$$U_0 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U \quad (1)$$

为了说明图4谐振电路的特性,对负载电阻 $R$ 两端电压、功率以及电容 $C_2$ 两端电压随着负载电阻

$R$ 变化进行仿真研究,结果如图5所示。

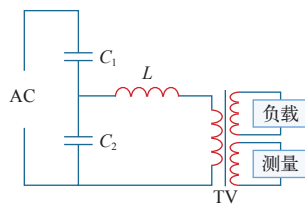


图3 电容式电压互感器原理

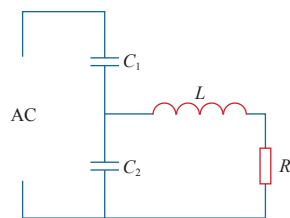


图4  $C_1$ 、 $C_2$ 和 $L$ 谐振电路

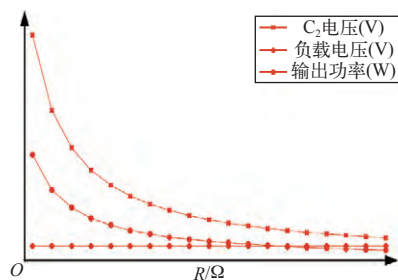


图5 谐振电路特性曲线

从图5可以看出,电路输出电压不受负载影响,当输出功率较大时,高压电容 $C_1$ 、分压电容 $C_2$ 和谐振电感 $L$ 两端的电压也会很高。因此当所需功率较大时,对 $C_2$ 和 $L$ 耐压要求较高;但是当输出功率较小时,可以有效降低 $C_2$ 和 $L$ 所需电压等级。

## 1.2 高压取电电路设计

通过前文分析可知,在电容式电压互感器中,通过 $C_1$ 和 $C_2$ 与补偿电抗器 $L$ 调谐,可以降低负载对变压器输入电压的影响,但是对 $C_2$ 和 $L$ 的耐压要求比较高,尤其是在电源电压较高、输出功率较大时。由于高压电容容量都很小,为了保证输出功率,分压电容 $C_2$ 、补偿电抗器 $L$ 和变压器都是中压等级,电网电压等级越高,要求 $C_2$ 容量就越大,其生产成本也随之增大,导致取电成本随之增大。为了节省成本、扩大取电电路的适用范围,本文对前文几种电路进行了改进,提出一种高压取电电路,其原理如图6所示。

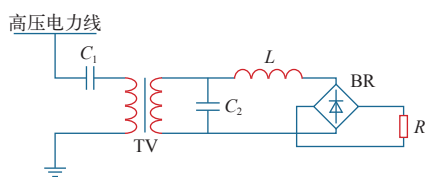


图6 改进的取电电路

在图6中，将分压电容 $C_2$ 并联在变压器二次侧，再和匹配电抗器 $L$ 串联，可以大幅度降低电容 $C_2$ 和电抗器 $L$ 的电压等级。当图6中变压器为理想变压器，励磁阻抗为无限大且不考虑漏感和绕组电阻时，经过阻抗折算后，图6电路与图4电路是相同的。而实际上变压器励磁阻抗不可能无穷大，考虑到效率也不能忽略空载损耗。研究发现，通过对元器件参数的合理设置，使电路中 $C_1$ 、 $C_2$ 、隔离变压器TV和 $L$ 谐振或者接近谐振，从而为负载 $R$ 提供一个相对稳定的电压，只要参数设计合理，则可以达到既满足负载所需功率，又保证变压器工作在额定电压范围内的技术指标。

## 2 电路参数设置

### 2.1 变压器的选取

为了提供足够的输出功率，鉴于变压器效率以及电路的损耗，变压器通常为中压变压器。变压器的效率是影响整个取电电路效率的关键因素，降低变压器的空载损耗、提高励磁阻抗是设计变压器的重要指标。C型变压器与EI型变压器相比，具有空载损耗小、磁路气隙小和励磁阻抗大的优点，因此选用C型变压器<sup>[8]</sup>。

### 2.2 分压电路参数设置

从前文分析可知，当变压器为理想变压器时，图6取电电路的等效电路就是图4中的电路，因此可以按照图4近似求出各元件的参数。根据图4电路可得，交流电源频率为 $\omega$ ，则 $C_1$ 、 $C_2$ 和 $L$ 谐振方程为

$$L(C_1 + C_2) = \frac{1}{\omega^2} \quad (2)$$

$U_{IN}$ 为变压器的一次额定电压， $U$ 为电网电压有效值， $C_2$ 支路与 $L$ 、 $R$ 的串联支路并联后的分压应为变压器的额定值，即

$$\left| \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right| = \frac{U_{IN}}{U} \quad (3)$$

式中， $Z_1$ 为电容 $C_1$ 的容抗； $Z_2$ 为 $C_2$ 支路与 $L$ 、 $R$ 串联支路并联后的阻抗，因此有

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1} \\ Z_2 = \frac{1}{\left(\frac{1}{R + j\omega L} + j\omega C_2\right)} \end{cases} \quad (4)$$

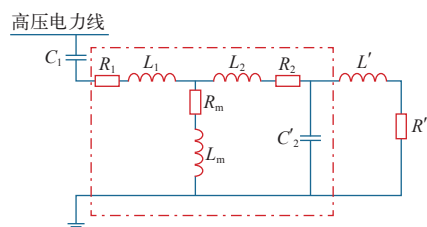
负载两端电压 $U_0$ 应满足负载所需功率 $P$ ，即

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2} U = \sqrt{PR} \quad (5)$$

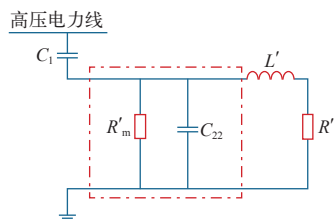
通过对式(2)~式(4)联立方程组，可以求出 $C_1$ 、 $C_2$ 和 $L$ 的参数，即

$$\begin{cases} L = \sqrt{\frac{U_{IN}^2 R - PR^2}{\omega^2 P}} \\ C_1 = \frac{\sqrt{PR}}{U} \times \frac{1}{\omega^2 L} \\ C_2 = \frac{1}{\omega^2 L} - C_1 \end{cases} \quad (6)$$

由于以上分析是基于理想变压器的，为了求取较准确的参数值，将图6电路中变压器按照T形网络进行等效<sup>[9]</sup>，等效结果如图7a所示。在图7a中， $C'_2$ 、 $L'$ 和 $R'$ 为经过阻抗由变压器二次侧折合成到一次侧的值； $R_1$ 、 $L_1$ 为一次侧电阻和漏电感； $R_2$ 、 $L_2$ 为二次侧电阻和漏电感折合成到一次侧的值； $C'_2$ 和



(a) 等效电路1



(b) 等效电路2

图7 改进的取电电路的等效电路

$L'$ 为图6中 $C_2$ 和 $L$ 折合到一次侧的值。

通过选取合适的电容参数 $C'_2$ ，可以将图7a电路用图7b电路再次等效<sup>[10]</sup>。图7b中， $R'_m$ 为变压器损耗的有功功率，可以通过空载实验测出。从图7b可以看出， $R'_m$ 的分流作用必然会影响到输出功率，从而使负载功率达到最大值。图8中给出了受 $R'_m$ 影响时，输出功率以及变压器一次电压的变化趋势曲线。

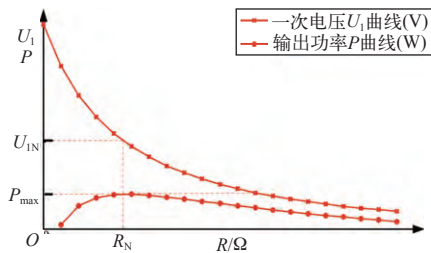


图8  $R'_m$ 对电路输出的影响

由图8可知，通过计算选取合适的元件参数，保证获得所需的功率 $P_{\max}$ ，同时变压器不超过额定电压 $U_{IN}$ ，该电路就可以做稳压电源。因此，根据图7b电路可列出如下方程。

首先，电容 $C_1$ 、 $C_{22}$ 和匹配电感 $L'$ 谐振方程为

$$L'(C_1 + C_{22}) = \frac{1}{\omega^2} \quad (7)$$

其次， $C_{22}$ 支路、 $R'_m$ 支路与 $L'$ 和 $R'$ 串联支路并联后的分压应为变压器额定值，即

$$\left| \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right| = \frac{U_{IN}}{U} \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{1}{j\omega L} \\ Z_2 = \frac{1}{\frac{1}{R' + j\omega L'} + j\omega C_{22} + \frac{1}{R'_m}} \end{cases} \quad (9)$$

再次，负载两端电压应满足其所需功率 $P$ ，即

$$\frac{R'}{\sqrt{R'^2 + (\omega L')^2}} U_{IN} = \sqrt{PR'} \quad (10)$$

最后，令变压器在额定状态下空载损耗的有功功率为 $p$ ，则变压器空载损耗等效电阻为

$$R'_m = \frac{U_{IN}^2}{p} \quad (11)$$

通过式(7)~式(11)联立方程组，得到所需参数的计算结果为

$$\begin{cases} L' = \sqrt{\frac{U_{IN}^2 R' - p R'^2}{\omega^2 p}} \\ C_1 = \sqrt{\frac{U_{IN}^2 [(R' + R'_m)^2 - R'_m + \omega^2 L'^2 + R'^2 R'_m / \omega^2 L'^2]}{U^2 (L'^2 R'_m \omega^4 + R'^2 R'_m \omega^2)}} \\ C_{22} = \frac{1}{\omega^2 L'} - C_1 \end{cases} \quad (12)$$

利用图7a、b点画线方框内的阻抗相同，可列出如下方程（为了计算简便，忽略变压器漏感和绕组直流电阻），即

$$\frac{1}{R_m + j\omega L_m} + j\omega C'_2 = \frac{1}{R'_m} + j\omega C_{22} \quad (13)$$

根据式(13)左右两边阻抗的实部和虚部分别相等，可得：

实部相等

$$\frac{R_m}{R_m^2 + (\omega L_m)^2} = \frac{1}{R'_m} \quad (14)$$

虚部相等

$$\frac{j\omega \{ [R_m^2 + (\omega L_m)^2] C'_2 - L_m \}}{R_m^2 + (\omega L_m)^2} = j\omega C_{22} \quad (15)$$

进而得到

$$C'_2 = \frac{C_{22} [R_m^2 + (\omega L_m)^2] + L_m}{R_m^2 + (\omega L_m)^2} \quad (16)$$

在变压器参数可测或已知的前提下，就可以计算出参数 $C_1$ 、 $L'$ 和 $C'_2$ ，再将 $L'$ 、 $C'_2$ 折合到变压器二次侧，就是本文取电电路所需 $L$ 和 $C_2$ 的值，通过这种计算方法可以近似求出取电电路所需的电容 $C_1$ 、 $C_2$ 和 $L$ 的值，计算结果误差不大。

### 2.3 过电压保护电路

当系统发生过电压时，为了保护电路设计了两种过电压保护电路，如图9a、b所示。能耗保护电路通过并联电阻，减小变压器及后续负载的等效阻抗，从而减小与高压电容的分压来实现保护功能；电容降压型保护相当于增大了分压电容

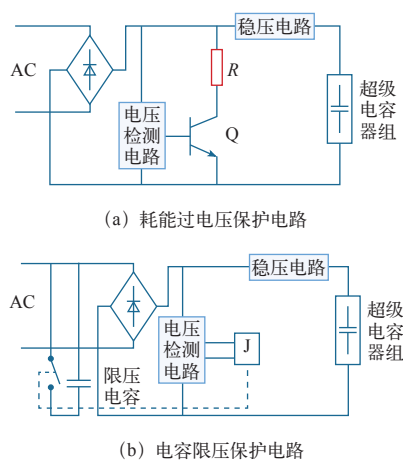


图9 过电压保护电路

$C_2$ ,从而使高压电容分压增大、变压器一次电压降低,并实现保护功能。当负载为超级电容或者电池等储能装置且储能装置充满电时,电路接近空载,调节能耗电阻使变压器输入电压为额定值,既保证了变压器的安全,又可以补充储能装置的微弱漏电。

### 3 实验及分析

为了验证所设计的取电电路的可靠性,本文制作了一台输出电压为DC 24 V、功率为10 W的样机。样机使用的变压器是AC 2 000 V/AC 27 V的C型变压器,整流稳压电源模块为AC 27 V/DC 24 V,分压电容 $C_2$ 为66  $\mu$ F,匹配电感为80 mH,样机实物如图10所示,为了在实验时更换电容方便,本文将高压电容油浸,在实际应用中需要树脂灌封。

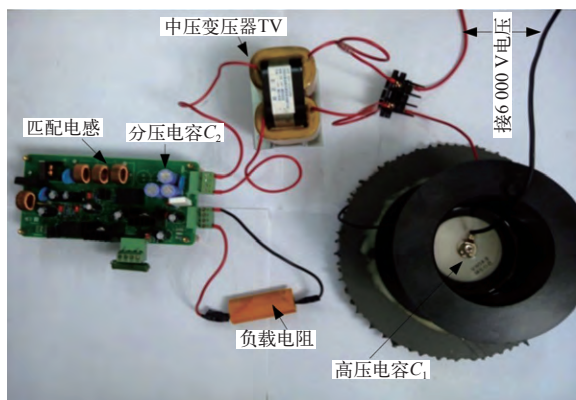


图10 取电电路实物

实验时,为取电电路带不同电阻负载,测量

变压器一次电压和负载电阻两端电压,计算负载消耗的功率,从而得到变压器一次电压和输出功率变化曲线,如图11所示。

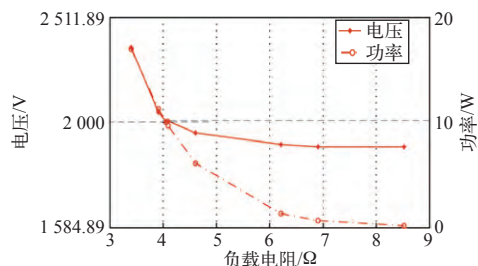


图11 不同负载对应的功率和一次电压曲线

由图11可知,当负载为24 V/10 W时,变压器电压为2 000 V;当负载小于10 W时,变压器一次电压略低于额定电压;当负载大于10 W时,若不加避雷器保护电路,一次电压会超过变压器额定值,验证了前文的仿真结果。因此变压器一次绕组需并联避雷器,防止出现过载的过电压,将一次绕组输入电压限制在额定负载范围内,保证取电电路的安全。

在匹配电感参数分别为0 mH、80 mH和120 mH时,使用本文提出的取电电路为超级电容器组进行充电实验。超级电容器组容量为10 F,额定电压为24 V。实验中每隔1 min测量1次电容器组电压,充电电压随时间变化曲线如图12所示。由图12可知,电感参数选取得当可以提高充电速度。

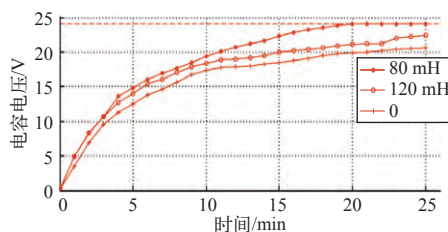


图12 超级电容充电实验曲线

当系统发生过电压时,继电器动作,使保护电容投入电路,与分压电容 $C_2$ 并联,相当于增大了 $C_2$ 容量。保护电容投入后拉低变压器二次电压,从而保护电路,如图13所示,电路正常工作时,保护电容两端电压为零,过电压时将电压限制在安全范围内,即使长时间过电压也不会对电路造成破坏。

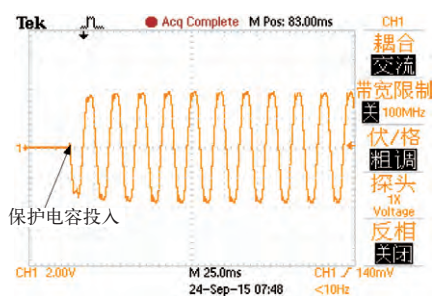


图13 电容过电压保护

## 4 结束语

本文提出一种新的取电思路,通过在中压变压器的二次侧并联分压电容、串联匹配电感,利用分压电容、变压器和匹配电感谐振来提供相对稳定的电压输出。对电路进行了分析和实验,得到如下结论:

- 1) 取电电路的关键在于变压器的设计,变压器的励磁阻抗和效率直接影响整个电路的输出功率。
- 2) 给出了各元件参数的计算方法,设计了能耗型和电容限压型两种过电压保护电路。
- 3) 通过样机带载实验,验证了所提出的新高压取电电路的可靠性。

## 参考文献

[1] 张文亮,刘壮志,王明俊,等.智能电网的研究

进展及发展趋势[J].电网技术,2009,33(13):1-11.

- [2] 霍骋,石夏琴,何怡刚.智能电网中射频识别技术的研究[J].电工技术学报,2013,28(2):384-386.
- [3] 宋振.电流互感器取电的开关电源研究[D].西安:西安科技大学,2010.
- [4] 周良璋,张庆华,等.高压电容取电装置:中国,CN 203813534 U[P].2014-09-03.
- [5] 元增民.变压器输入阻抗与输出阻抗的分析计算[J].变压器,2006,43(8):5-9.
- [6] 马朝华.电容式电压互感器暂态特性研究[D].郑州:郑州大学,2007.
- [7] 王乐仁.一种用于高压电能表供电信号的电容式分压器:中国,CN 203149007 U[P].2013-08-21.
- [8] 贝冠祺,王全保.小功率变压器[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [9] 李发海,王岩.电机与拖动基础[M].3版.北京:清华大学出版社,2005.
- [10] 陈希有.电路理论基础[M].3版.北京:高等教育出版社,2005.

(收稿日期:2015-11-12) EA

(上接第46页)

- [7] 吕振国.高压开关柜局部放电检测技术探析[J].低碳世界,2016(3):50-51.
- [8] 匡红刚,张占龙.基于紫外光功率法的电力设备电晕放电检测仪[J].现代科学仪器,2009(4):36-39.
- [9] 胡伟涛,王胜辉.浅谈紫外检测仪检测电晕放电的影响因素[J].华北电力技术,2009(1):6-13.
- [10] 杜林,崔婷,孙才新.UVTRO NR2862型紫外传感器检测交流电晕放电[J].高电压技术,2009(35):272-276.
- [11] 王灿林,王柯,王黎明,等.基于紫外光脉冲检

测技术的绝缘子电晕特性研究[J].中国电机工程学报,2007(36):19-25.

- [12] 黄新波,王列华,唐书霞,等.智能变电站开关柜综合状态监测IED设计[J].中国电力,2014(2):84-89.
- [13] 袁昌武,何为,陈涛.应用紫外法检测低值(零值)绝缘子的实验研究[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2008(1):78-81.
- [14] 李青文,陈涛,汪金刚,等.紫外脉冲法在特高压放电检测中的应用[J].高电压技术,2006(12):26-29.

(收稿日期:2016-06-14) EA