

# 基于真空触发开关的合成关合试验回路及其控制策略

范兴明, 邹积岩, 丛吉远

(大连理工大学电气工程及应用电子技术系, 辽宁 大连 116024)

## Synthetic Making Testing Circuit and Control Strategy Based on Triggered Vacuum Switch

FAN Xing-ming, ZOU Ji-yan, CONG Ji-yuan

(Department of Electrical and Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**摘要:** 概括了断路器关合短路电流时由预燃弧阶段开始的物理过程, 对比了触发火花间隙和真空触发开关用作快速关合装置时的触发特性, 提出了一种在全电压条件下进行合成关合的试验回路。对全电压条件下进行合成关合试验时, 外施电压相位控制, 外施电压与关合电流相位差要求进行了分析, 并提出了相应的控制策略和解决方法; 对影响控制准确度的主要因素进行了分析。

**关键词:** 全电压; 真空触发开关; 预燃弧;

合成关合试验回路; 控制策略

中图分类号: TM83

文献标识码: A

**Abstract:** Beginning from pre-arcing between the electrodes during breaker making the short-circuit process, this physical process is discussed. The trigger characteristics of triggered spark gaps and of triggered vacuum switch are compared, and a synthetic making circuit at full-rated voltage is presented. The control of the phase of applied voltage, and the demand of the phase difference between applied voltage and making current in synthetic making test under full-rated voltage are provided. The strategy and the main factors effecting controlling accuracy are also analyzed.

**Key words:** full-rated voltage; triggered vacuum switch (TVS);

pre-arcing; synthetic making test circuit;

controlling strategy

## 1 引言

大容量高压试验站对断路器等高压开关设备新产品的的设计、开发和性能测试起着非常重要的作用。随着电力系统容量、电压等级的不断提高, 直接试验已经不能满足要求而且也是非常不经济的。合成试验是目前普遍采用的方法, 对于合成关合试验, 早在20世纪六、七十年代, CIGRE 就对合成关合试验的基本规则和具体实施条件进行了讨论和研究<sup>[1-2]</sup>。针

对国内各大电力试验站现有设备状况和试验条件, 笔者提出了以真空触发开关作为电流源快速关合装置的合成关合试验回路。重点阐述了关合试验中的控制策略及其实现, 并对试品合闸相位、合闸时间分散性和预击穿特性等影响控制准确度的主要因素进行了分析。

## 2 短路关合过程分析

### 2.1 两种极端相位情况下的合闸操作

为了对断路器短路关合能力进行适当和全面的考核, 根据国际电工委员会(IEC)和国标<sup>[3-4]</sup>中列出的两种极端情况, 即在外施电压峰值和零点处关合。对于开关设备当在电压波的任意一点发生预击穿出现短路电流时都应能进行可靠的关合。因此试验时可以分两次操作完成: ①第1次合闸操作在规定的电压峰值进行, 产生对称短路电流, 具有最大的预燃弧时间; ②第2次合闸操作在电压波的零点, 出现最短预燃弧甚至不燃弧, 产生最大的非对称短路关合电流。图1给出了这两种情况下关合的波形示意图。实际合闸过程中, 在外施电压的正负两个半波都有可能发生击穿, 为了简化分析过程, 图1及下文将外施电压波形都翻到了正半波, 这种简化对分析结果没有实质影响。

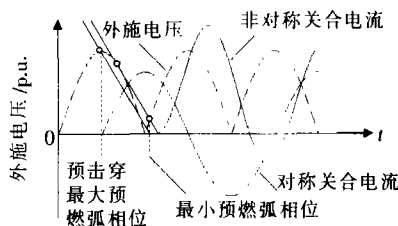


图1 电压波峰值和零点合闸时短路关合电流示意图

### 2.2 关合过程中触头间隙的绝缘特性

关合过程中相互靠近的两触头间隙的绝缘特性

收稿日期: 2005-08-20; 修回日期: 2005-09-14

作者简介: 范兴明(1978-), 男, 博士研究生, 主要从事智能化开关电器及试验研究

与绝缘介质以及触头的间距密切相关。根据断路器的合闸特性,并假设在小间距情况下,触头间隙的平均电场强度  $E$  和触头平均运动速度  $v$  为常量。因此触头间隙的关合绝缘特性  $u_d(t)$  对时间求导可以得到绝缘特性下降率  $RDDS$ ,其绝对值为:

$$|RDDS| = \left| \frac{du_d(t)}{dt} \right| = E \cdot v \quad (1)$$

当外施电压以正弦波  $u(t) = U_m \sin \omega t$  表示时,其中,  $U_m$  和  $\omega$  分别为外施电压的幅值和角频率,其最大变化率:

$$\left| \frac{du(t)}{dt} \right|_{\max} = \omega U_m |\cos \omega t|_{\max} = \omega U_m \quad (2)$$

$$\text{令: } K_{RDDS} = \frac{E v}{\omega U_m} \quad (3)$$

当  $K_{RDDS} = 1$  时,表示关合绝缘特性与外施电压过零点处的切线平行。关合绝缘特性和外施电压都有特定的形状和数值,当关合的触头间隙的耐压强度低于外施电压时就会产生预击穿。事实上,大多数情况下断路器的电气关合瞬间和机械关合瞬间不是同时发生的。电气关合瞬间决定于施加于触头两端的电压波形与关合绝缘特性的交点,交点处的电压和相位即为预击穿电压和预击穿相位,而关合绝缘特性与时间轴的交点为机械关合时刻。

图2所示为  $K_{RDDS} < 1.0$  时,关合绝缘特性与外施电压的一种相交关系。关合指令发出时刻不同,相当于关合绝缘特性在图上作水平移动;B、B'是关合绝缘特性与外施电压波形的切点,如图所示,只要关合绝缘特性再右移交点立即由B'点跳至A点,也就是说,预击穿只能发生在A-B相位区间。当  $K_{RDDS} \geq 1.0$  时,关合绝缘特性的斜率总是大于或等于外施电压最大变化率的幅值,因此电气关合瞬间可以落在外施电压波形的任意一点,关合速度达到一定数值时才会出现。

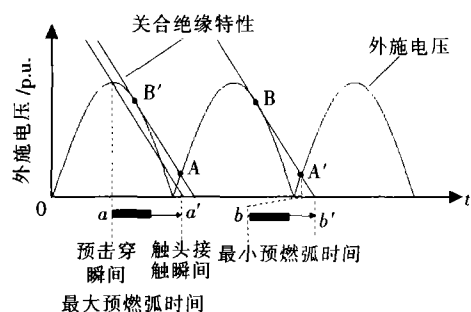


图2 关合绝缘特性与外施电压的关系

### 3 真空触发开关和合成关合试验回路

合成关合试验回路电压源可由一小容量变压器或振荡回路构成,其关键设备是断口耐压高并且适合关合强电流的快速关合装置。为了满足与直接试验的等价性,从电压源到电流源投入的转换时间应限制在  $300 \mu s$  以内<sup>[5]</sup>,国内外均有用触发火花间隙

作为该快合装置的报道<sup>[6-7]</sup>。

与触发火花间隙相比,触发真空开关(TVS)具有很多优点:相同通流容量时,体积比火花间隙缩小近50%;火花间隙的电极需要定期清洗和更换,TVS由于电弧电压低,电极烧蚀率极低,主电极寿命一般不受限制;TVS触发电压低,不易对周围环境产生电磁干扰。此外,由于真空介质绝缘水平高、弧后等离子体扩散速度快,TVS具有在较高频率下重复导通和关断高电压大电流的能力;导电通道密闭在真空中不受外界干扰,工作可靠性高,导通速度快,可达数十纳秒级。

基于TVS的以上优点,笔者采用其作为电流源的快速关合装置,图3为试验线路接线简图。图中虚线框所示为快速关合装置,由TVS和并联短接开关-真空断路器(VCB)构成,见图3(a)。关合试验时,由试品关合电压源,实时检测电流传感器(罗氏线圈)的输出,由于预燃弧时间一般较短,以连续采样3次的采样值与事先设定的阈值进行比较,判断是否发生预击穿;如发生预击穿则设置预击穿发生标志并发往控制器,该过程花费时间接近  $20 \mu s$ 。与此同时,跟踪电流源电压信号对其相位进行同步,根据回路参数可实现对关合电流相位的跟踪,从而准确控制关合时刻外施电压与短路关合电流之间的相位关系。综合以上两条件,通过快速关合装置对电流源投入时刻进行准确控制。并联短接开关由配永磁操动机构的单相真空断路器串联组成(实验室中测得其合闸时间不超过  $10 ms$ ),其合闸指令与TVS的触发指令同时发出,由TVS快速接通电路,并联短接开关随后闭合,大电流转移到该回路,以减少对TVS电极的烧蚀,延长关合装置的使用寿命。

图4为合成关合试验回路控制系统结构原理图。主控微机完成对试品开关的相关参数包括合闸时间、预燃弧时间等参数的预先设置,以及试验结果

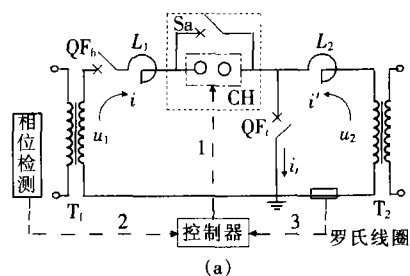


图3(a) 全电压合成关合试验回路接线简图

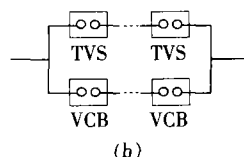


图3(b) 全电压合成关合试验回路接线简图

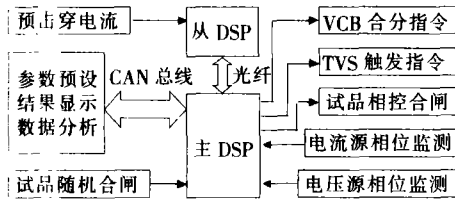


图 4 合成关合试验控制系统原理图

的显示和数据分析等功能。数据采集和处理芯片采用高速 DSP，处理器之间以及处理器和传感器之间的数据传输均采用光纤通信，增强了试验系统的抗干扰能力和可靠性。

### 4 关合试验中的相位控制及策略

#### 4.1 外施电压合闸相位控制

由前面章节叙述可知对开关的关合能力进行验证时试验可分两次完成，为了满足标准所规定的合闸相位及容差要求<sup>[3-4]</sup>，需要对合闸相位进行精确的控制。

图 5 以进行具有最大预燃弧的关合试验为例说明合闸相位的控制时序。处理器实时跟踪外施电压的变化，检测到  $t_{zero}$  时，启动定时器开始计时并监视随机合闸指令  $t_h$  的到来，当  $t_h - t_{zero} \geq 1/f$  时，定时器复位重新开始计时，其中  $f$  为外施电压频率。当  $t_h - t_{zero} < 1/f$  时，经过  $t_c + t_d$  时间延时发相控合闸指令（图中  $t_m$  时刻），则经过  $t_{making}$  ( $t_{prk}$  时刻)运动的触头间隙发生预击穿，这时快速关合装置及时动作将电流源投入，直到  $t_{mkd}$  时刻触头完全闭合。 $t_c + t_d$  可由下式计算得出：

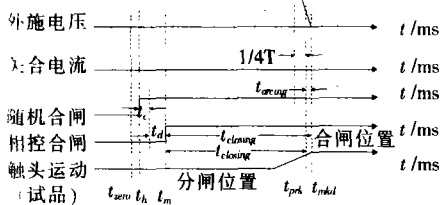


图 5 最大预燃弧条件下的关合时序控制

$$t_c + t_d = n \cdot T - (t_{making} - T/4) \bmod \frac{1}{2f} - (t_h - t_{zero}) \quad (4)$$

$$t_d = n \cdot T - (t_{making} - T/4) \bmod \frac{1}{2f} - (t_h - t_{zero}) - t_c \quad (5)$$

$$t_{making} = t_{closing} - t_{arcing} \quad (6)$$

因为当  $t_h - t_{zero} \geq 1/f$  时，定时器就会复位从新开始计时；在保证延迟合闸时间  $t_d$  为正值条件下，通常式(4)中  $n=1$  或  $2$ ，因此可得式(5)  $t_d$  的表达式，其中  $(A \bmod B)$  表示求余数运算。以上分析中， $t_h - t_{zero}$  由定时器数值给出， $t_c$  为处理器的运算时间， $t_{closing}$  和  $t_{arcing}$  分别为被试断路器的合闸时间和预燃弧时间，试验前都可以测得作为已知量处理。其中， $t_c$  应尽可能小，这一点采用高速数字信号处理器 DSP 完全可以实现。只要准确掌握外施电压的过零时刻，经过计算便可实现合闸相位的准确控制。

#### 4.2 外施电压与关合电流之间相位差及其控制

短路关合试验时，外施电压与短路电流之间的相位差应满足  $90^\circ \pm 27^\circ$  范围，这是试验标准综合考虑了关合装置的动作时延、外施电压与电流源电压之间的附加相位差以及电流源的功率因数等因素后做出的规定。

笔者提出的试验回路采用电压源与电流源同相位的接法，尽量减小二者附加相差的影响；采用触发真空间隙作为关合装置，从检测到预击穿电流到其闭合，动作时延小于  $100 \mu s$ ；并且使电流源的功率因数尽量小。仍以具有最大预燃弧的短路关合为例，图 6 所示为外施电压与关合电流的相位关系。

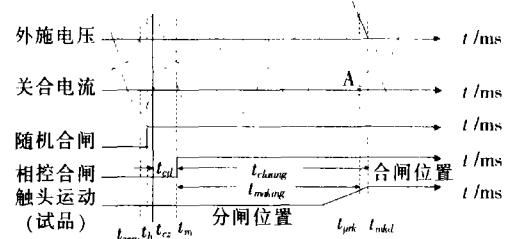


图 6 外施电压与关合电流的相位关系示意图

与上述外施电压合闸相位控制时序图类似，处理器实时检测电流源电压相位变化，为了便于说明图中画出的是关合电流的波形，二者相差一固定的相位。当检测到电流过零点  $t_c$  定时器开始计时，并等待相控合闸指令发出时刻  $t_m$ ，当  $t_m - t_c \geq 1/f$  时，定时器复位重新开始计时，其中  $f$  外施电压频率。当  $t_m - t_c < 1/f$  时，定时器停止计时，因此有下式：

$$\Delta t = t_{cd} + t_{making} - m \cdot \frac{1}{2f} \quad (7)$$

$$t_{cd} = t_m - t_{cz} \quad (8)$$

其中  $m$  取值为使  $|\Delta t|$  较小的正整数，根据外施电压与短路电流之间相位差应满足  $90^\circ \pm 27^\circ$  的范围，即要求  $|\Delta t| \leq 1.5 \text{ ms}$ ，作为电流源投入装置—触发真空开关是否触发的判据之一；而另一判据则以是否检测到预击穿电流为依据。在不满足以上两条判据的情况下进行关合，不能正确反映被试开关的性能，试验结果应判为无效。增加电流源投切条件的检验，不但可以提高试验的成功率，而且还可以避免触发真空间隙主电极和触发电极不必要的烧蚀，从而延长快合装置的使用寿命，同时也可减轻被试开关由于不成功试验造成的烧蚀。

### 5 影响控制准确度的主要因素

#### 5.1 过零点检测误差

笔者提出的控制系统需要对电压源和电流源相位进行同步，这是通过零点探测来实现的。影响过零点提取的因素很多，主要有谐波分量、白噪声以及测量噪声。采取 FIR 带通滤波和中位值滤波技术消除以上因素对检测准确度的影响<sup>[8]</sup>。对由 FIR 滤波后输出

信号零点,采用线性内插法即可获得参考信号的过零时刻。电网频率波动也将对检测准确度产生影响,当电网允许频率波动为(50±0.5) Hz时,采用上述方法对参考信号过零点检测的最大误差不超过0.1 ms。

### 5.2 试品合闸时间分散性的影响

断路器的典型合闸时间为50 ms,其定义为合闸线圈通电到触头接触的时间间隔。合闸时间随着环境温度、控制电压变化以及运行期间由于弹跳和电弧烧蚀引起触头的磨损等原因而具有一定的分散性。合闸时间分散性成为比较关注的问题,也是影响相控合闸控制准确度的主要因素之一。

由图5,图6及式(4)~式(8)可以看出,合闸时间的分散性通过以下两个方面对系统的控制准确度产生影响。一是直接影响试品相控合闸指令的发出时刻,二是影响外施电压与短路电流之间的相位差是否满足90°±27°范围的判据。

以额定参数为12 kV,25 kA真空断路器配永磁操动机构进行20次合闸操作为例说明合闸时间分散性的影响,测量结果见表1,其中最大偏差为0.8 ms,与文[9-10]得到的结果类似。对于真空断路器来讲,其动态特性主要受控制电压和工作环境温度的影响<sup>[11]</sup>,控制电压影响分合闸线圈的励磁电流*i*;环境温度主要影响电容量*C*和开关的动作阻尼系数 $\eta$ <sup>[8]</sup>。

表1  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}, U_c=300\text{ V}$  时合闸时间的测量

No.	时间	No.	时间	No.	时间	No.	时间
1	15.5	6	15.2	11	15.1	16	15.4
2	15.4	7	15.4	12	15.6	17	15.5
3	15.9	8	15.3	13	15.8	18	15.3
4	15.6	9	15.8	14	15.4	18	15.2
5	15.3	10	15.7	15	15.6	20	15.5

根据所测数据,图7给出了控制电压 $U_c$ 对开关合闸时间影响的统计特性。从图7可知,合闸时间随着控制电压的减小而延长。根据试验数据分析控制电压对开关动作特性的影响特征,对于真空断路器,采用离线测量的控制电压、环境温度和开关合闸时间的关系,采用线性插值算法,补偿控制电压和环境温度的变化对开关操动时间的影响。对于其它类型的开关设备,根据具体影响因素采取相应措施,对合闸时间分散性进行补偿以减小对控制器准确度的影响。

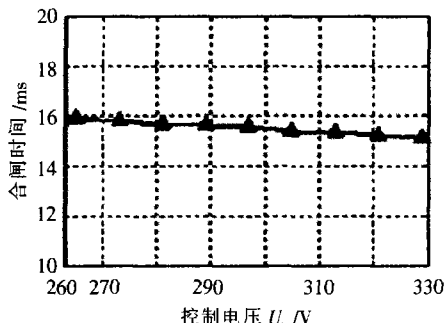


图7 控制电压对合闸操作时间的影响

### 5.3 试品预击穿特性的影响

影响击穿电压的因素很多,包括触头开距、触头的形状和材料、外施电压形状、触头的表面状况以及操作历史等。可见,击穿电压受多种因素的影响而且具有较大的分散性,对关合试验相位控制准确度将产生不可避免影响。

为了说明试品预击穿特性对关合时相位控制准确度的影响,以额定电压为31.5 kV的真空断路器进行具有最大预燃弧(电压源峰值关合)的直接关合试验为例,图8示出了在不同电压相位点击穿时的试验波形,图中:上面曲线为电压,下面曲线为关合电流。由上述可知,开关设备在电压波的任意一点发生预击穿出现短路电流时都应能进行可靠的关合。关合试验时分两次操作完成:规定的外施电压峰值和电压波的零点进行,两种情况下关合电流含有的非周期分量、燃弧时间有所不同。比较图8(a),(b)两波形可以看出,图8(a)预击穿相位偏离峰值较大,因此关合电流含有的非周期分量也大,燃弧时间较短;而图8(b)预击穿发生时接近外施电压峰值,关合电流中含有的非周期分量较低,但燃弧时间长,相对图8(a)来说,这次最大预燃弧的关合试验较为成功。

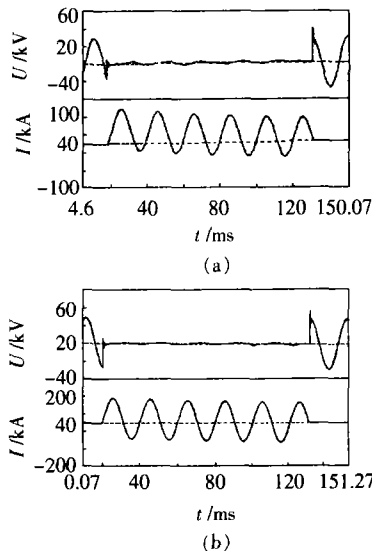


图8 预击穿特性对关合试验的影响

## 6 结语

(1)简要分析了断路器关合的物理过程;根据国内各大高压试验站的现有设备和实验条件,提出了一种以真空触发开关作为电流源的快速合闸装置的合成关合试验回路。

(2)详细讨论了合成关合实验系统的控制策略,增加了电流源投入的判据,减少了电流源合闸装置和试品不必要的烧蚀,从而提高试验的成功率。

(3)对影响控制准确度的主要因素进行分析并给出了相应的控制和补偿措施。(下转第440页)

其它两相暂时不切换的情况。可见三相储能结构动作所需传动轴转动的圈数并不一样,从而造成三相开关切换有先有后。分析认为,有载分接开关的分接变换动作是一个电流的转换过程,对三相分接开关来说,即使在切换过程中某一相先动作,电流仍在该相的电路通过,因此三相触头分合的先后,对相互之间的切换电流没有明显的影响。另外,有载分接开关在切换过程中产生的电弧都是采用电流过零点自然熄弧的方式,而不是像断路器那样采用强迫熄弧的方式,这样分接开关三相触头的电弧熄灭本身就存在先后,所以其机械动作的先后差别不会影响有载分接开关的正常运行。该有载分接开关试验后投入运行,至今已将近两年,期间切换多次,无任何不正常现象。

### 5 结语

有载分接开关是变压器上一个重要的部件,通

过其切换波形的测试可以看出切换开关能否正确动作,进而判断有载分接开关是否存在电动机构动作异常、绝缘筒变形、触头烧损、传动轴断裂等故障。现场试验中由于种种原因,所测得的切换波形很难与标准波形完全吻合。所以试验人员在测试前,应该尽量多切换几次,减少油膜对测试结果的影响。在准确测量的前提下,正确分析测试波形与标准波形产生差异的原因,同时结合变压器其他相关试验的结果,综合考虑,得出正确的结论。

### 参考文献:

[1] 陈敢峰,姚集新. 变压器分接开关实用技术 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2002.  
[2] 冯仲民. 有载分接开关的应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 2004.  
[3] DL/T574-1995. 有载分接开关运行维修导则[S].

(上接第 437 页)

### 参考文献:

[1] Discussion Group 13. Synthetic Circuit for Making Tests [A]. in CIGRE Conference[C], Paris, CIGRE, 1966: 444-445.  
[2] CIGRE WG 13.04. Requirements for Testing Making Performance of High-voltage Circuit-breakers at Reduced Applied Voltage [J]. Electra 1979, 66(10): 27-33.  
[3] IEC62271-100: 2001. High-voltage Alternating Current Circuit Breakers[S].  
[4] GB1984-2003. 高压交流断路器[S].  
[5] Aldrovandi G, Bonfanti I, Kuhnhardt G, et al. New Application of Synthetic Circuit Development in CESI and IPH[A]. CIGRE Session 1992[C], Paris, CIGRE, 1992: 201.  
[6] 庄稼人,党晓鹰. 在最大预燃弧条件下进行关合试验的合成关合回路[J]. 高压电器, 1992, 28(3): 14-20.

[7] Sheng B L. Design Consideration of Weil-dobke Synthetic Testing Circuit for the Interrupting Testing of HV AC Circuit Breakers [A]. Power Engineering Society Winter Meeting[C], IEEE, 2001(1): 295-299.  
[8] 方春恩. 同步真空开关的相关理论及其应用研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2004.  
[9] Suiter H. Consequences of Controlled Switching for System Operation and Circuit Breaker Behavior [A]. CIGRE Session 1990[C], Paris, CIGRE, 1990: 202.  
[10] Dick E P, Fischer D. Point-on-wave Capacitor Switching and Adjustable Speed Drives [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(13): 1367-1372.  
[11] CIGRE WG 13.07. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers Guide for Application [J]. Electra, 1999, 183(4): 43-73.

(上接第 427 页)

### 5 结语

(1)输电线路零序参数必须实测,输电线路参数带电测量方法可以通过较少次数的测量得到互感线路的零序自参数和互参数,大大减少了线路的停电次数。

(2)根据输电线路首末端测量的电气量,计算得到的线路阻抗和导纳,不是一般意义上的阻抗和导纳,而是一个包含了波过程量。

(3)输电线路集总参数模型和分布参数模型可以相互转换,以满足工程上不同的需要。对于部分互感线路,互感部分分布参数须单独考虑。

### 参考文献:

[1] 陈允平,张承学,胡志坚. 以 GPS 为基础的线路参数带电测

量[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(6): 43-45.

[2] 张文涛,邱宇峰,郑旭军. GPS 及其在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 38-40.  
[3] 邱关源. 现代电路理论[M]. 北京:高等教育出版社, 2003.  
[4] 高中德. 超高压电网继电保护专题分析 [M]. 北京:水利电力出版社, 1990.  
[5] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术 [M]. 北京:水利电力出版社, 1983.  
[6] 胡志坚. 基于 GPS 的互感线路参数带电测量研究与实现[D]. 武汉:武汉水利电力大学博士学位论文, 1999.  
[7] 胡志坚,刘美观,张承学,等. 互感线路参数带电测量研究与实现[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(24): 32-35.  
[8] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.  
[9] 胡志坚,陈允平. 宁夏电网 220 kV 互感参数带电测量 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(17): 41-44.