

# “逆变”对交流侧灭磁与直流侧灭磁的影响

孟利军<sup>1</sup> 李自淳<sup>2</sup> 宣自平<sup>2</sup> 朱敏<sup>2</sup> 万力<sup>2</sup> 郑玉<sup>2</sup> 徐睿<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨电机厂有限责任公司控制设备事业部 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 中国科学院等离子体物理研究所科聚公司 安徽 合肥 230088)

**摘要:** 从理论上分析了同步发电机励磁系统“逆变”对交流侧灭磁与直流侧灭磁的影响,分“逆变”产生的反压峰值大于或小于灭磁电阻全部导通的残压2种工况分别讨论。然后通过1:1模拟试验验证理论分析的正确性,得出可信的结论。

**关键词:** 同步发电机; 逆变; 交流侧灭磁; 直流侧灭磁

## 0 引言

关于同步发电机交流侧灭磁与直流侧灭磁的探讨已经很多。其基本内容如下:

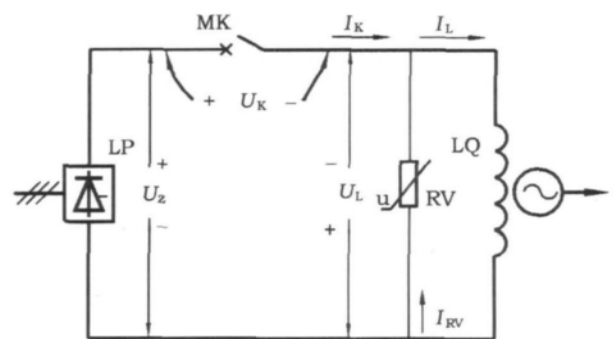
(1) 为了尽量减小故障的损失,当发电机及其直联主变内部或相关部分发生故障时,在继电保护动作切断电网主电源的同时,还要求尽快熄灭发电机内部的磁场,以尽快降低发电机的感应电势,熄灭故障电流。这就是快速灭磁保护。

(2) 为了实现快速灭磁,目前国内外广泛采用磁场断路器移能灭磁。其作用一是迅速切断发电机励磁绕组与励磁电源的通路;二是将发电机的励磁电流迅速转移到灭磁电阻中衰耗,磁场能量由灭磁电阻吸收。

(3) 过去和目前磁场断路器大都串联在励磁直流回路中,以下称直流侧灭磁方式,如图1所示。

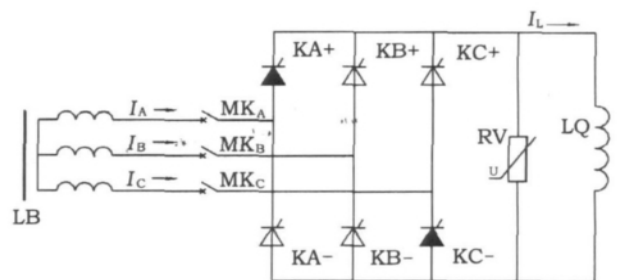
(4) 交流开关应用面广,产品种类繁多,工艺成熟,性能稳定,销量大,价格低。近年来发电机广泛采用交流整流静止励磁系统,为交流灭磁创造了条件。如用交流开关在整流励磁电源交流侧开断,如图2所示,同样能达到快速灭磁的效果,称之为交流侧灭磁方式。

(5) 保证磁场断路器正确换流的必要条件是,磁场断路器保证能达到的最大开断弧压(遮断电压)必须大于电源电压最大(强励时)峰值与灭磁电阻两端最大压降(最大灭磁电流通过时)之和。



LP - 励磁电源; LQ - 励磁绕组; MK - 磁场断路器  
RV - 灭磁电阻;  $U_z$  - 电源电压;  $U_k$  - 断路器弧压  
 $U_L$  - 转子电压;  $I_{RV}$  - 灭磁电阻电流;  $I_k$  - 断路器电流

图1 发电机直流灭磁简化接线图



LB - 励磁变压器次级; KA、KB、KC - 晶闸管;  
LQ - 励磁绕组; RV - 灭磁电阻; MK - 交流开关

图2 交流侧灭磁简化接线图

(6) 由于磁场断路器的性能所限,其最大开断弧压往往难以满足上述条件,所以必须加辅助措施。其中最常用的就是“切脉冲”,即在磁场断路器开断

前切除励磁功率整流器内晶闸管元件的触发脉冲。这样励磁电压从直流锯齿波变成交流正弦波,在负半周时容易满足换流条件而完成移能快速灭磁。

一般的励磁系统不设“切脉冲”环节。但目前广泛应用“逆变”环节,即在启动快速灭磁时,首先启动励磁调节器“逆变”,随后跳磁场断路器。笔者就想探讨“逆变”对交流侧灭磁与直流侧灭磁的影响。

### 1 “逆变”对交流侧灭磁的影响

#### 1.1 “逆变”产生的反压峰值大于灭磁电阻全部导通的残压

有的电厂(如三峡左岸电站)励磁整流阳极电压特别高,“逆变”产生的反压峰值大于灭磁电阻全部导通(即可以通过全部励磁电流)的残压。这样单靠逆变就可以把全部励磁电流转入灭磁电阻来完成换流,随后磁场断路器无电流开断。这时对磁场断路器的开断能力及弧压无任何要求。

#### 1.2 “逆变”产生的反压峰值小于灭磁电阻全部导通的残压

这时灭磁电阻不能全部导通,励磁电流不能全部转入灭磁电阻,磁场断路器 MK 和功率整流器内还有电流。流过 MK 三相断口的电流波形如图 3。

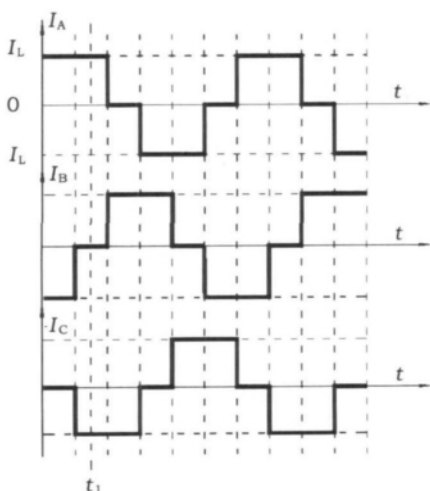


图 3 MK 断口电流波形图

任何瞬间只有二相通流,另一相电流为零。假定在  $t_1$  瞬间 MK 开断,此时晶闸管 KA+ 及 KC- 导通,其余均截止(见图 2)。但晶闸管的触发脉冲仍正常发送,6 根管子的触发脉冲按如下顺序不断轮流施加于各晶闸管: +A, -C, +B, -A, +C, -B。现在

KA+ 及 KC- 2 管已经触发导通。由于有电感 LQ 的续流作用,KA+ 及 KC- 的阳极电流大于维持电流,不能截止,开关断口  $MK_A$  及  $MK_C$  不能熄弧。B 相此时无电流,故  $MK_B$  轻松开断。接下来 KB+ 被触发,但此时 B 相阳极电源已开断,故 KB+ 不能导通,电流仍经 KA+ 及 KC- 流通;再过 3.33 ms KA- 被触发,这时 KA- 的阳极电压已转为正向,故 KA- 立即导通, KC- 截止;  $I_L$  经 KA- 及 KA+ 短路续流,  $MK_A$  及  $MK_C$  熄弧开断,见图 4。这时励磁电流经 2 只晶闸管正向导通续流自然衰减。因晶闸管的正向导通压降很低(约几伏),故灭磁时间很长,起不到快速灭磁的保护作用,但一般不会损坏设备。

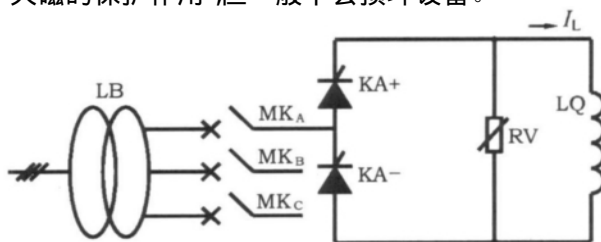


图 4 同相正负桥臂晶闸管导通续流灭磁等值电路

### 2 “逆变”对直流侧灭磁的影响

#### 2.1 “逆变”产生的反压峰值大于灭磁电阻全部导通的残压

这时和上述 1.1 节相同,单靠逆变就可以把全部励磁电流转入灭磁电阻,完成换流,随后磁场断路器无电流开断。这时对磁场断路器的开断能力及弧压无任何要求。

#### 2.2 “逆变”产生的反压峰值小于灭磁电阻全部导通的残压

这时灭磁电阻不能全部导通,励磁电流不能全部转入灭磁电阻,磁场断路器 MK 和功率整流器内还有电流。但“逆变”和“切脉冲”一样也能产生反向电压,该电压和磁场断路器的开断弧压同向叠加,帮助换流,降低对磁场断路器弧压的要求。在磁场断路器弧压相同时,可以缩短换流时间,减少断路器弧室和触头的烧损。这一点和“切脉冲”有共同之处,但如逆变时控制角  $\alpha < 150^\circ$ ,反压峰值就达不到阳极电压的峰值,效果不如“切脉冲”。

### 3 模拟验证试验

#### 3.1 试验目的

通过 1:1 模拟试验,验证上述理论分析的准确性。

### 3.2 试验原理接线图

试验接线见图 5 和图 6。

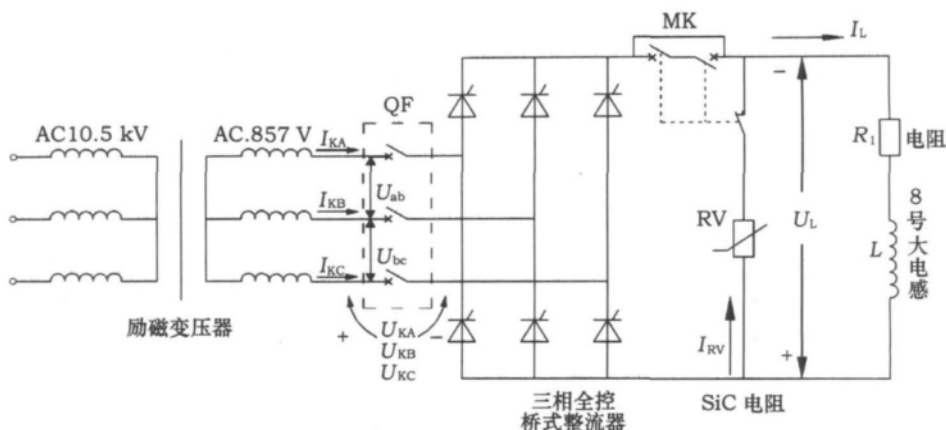


图 5 交流侧灭磁模拟试验原理接线图

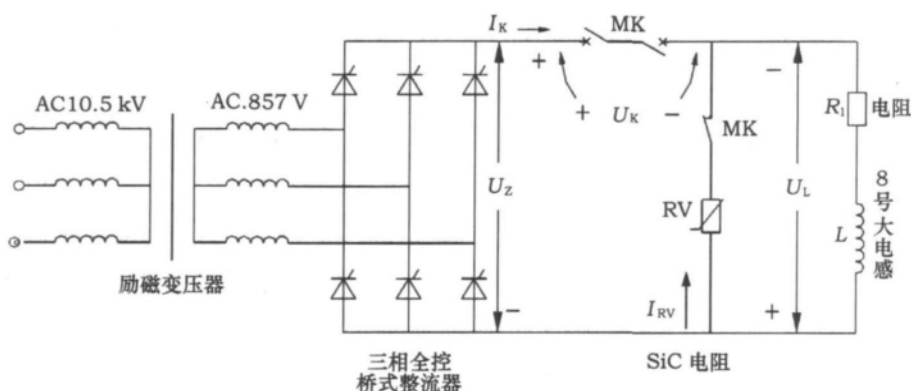


图 6 直流侧灭磁模拟试验原理接线图

### 3.3 试验参数

额定电流灭磁试验:  $I_L \leq 500 \text{ A}$ ,  $U_L \leq 250 \text{ V}$ ,  $L = 0.3 \text{ H}$ ,  $R_1 = 0.5 \Omega$ ;

强励电流灭磁试验:  $I_L \leq 1000 \text{ A}$ ,  $U_L \leq 500 \text{ V}$ ,  $L = 0.3 \text{ H}$ ,  $R_1 = 0.5 \Omega$ 。

### 3.4 录波量

$U_L, U_Z, U_K, U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}, U_{KA}, U_{KB}, U_{KC}, U_L, U_{RV}, U_K, U_{KA}, U_{KB}, U_{KC}$  共 15 个量。

15 个录波量的检测位置和正负极性见图 5 和图 6,录波量的定义见表 1。

表 1 录波量定义表

序号	代号	定义
1	$U_L$	转子电压(电感电压)
2	$U_Z$	整流输出电压
3	$U_K$	直流开关断口电压

(续表 1)

序号	代号	定义
4	$U_{ab}$	AB 相交流线电压
5	$U_{bc}$	BC 相交流线电压
6	$U_{ca}$	CA 相交流线电压
7	$U_{KA}$	交流开关 A 相断口电压
8	$U_{KB}$	交流开关 B 相断口电压
9	$U_{KC}$	交流开关 C 相断口电压
10	$I_L$	转子电流(电感电流)
11	$I_{RV}$	灭磁电阻电流
12	$I_K$	直流开关断口电流
13	$I_{KA}$	交流开关 A 相断口电流
14	$I_{KB}$	交流开关 B 相断口电流
15	$I_{KC}$	交流开关 C 相断口电流

以上各量不同时录取。交流侧灭磁和直流侧灭磁分别录取不同量(见图 5 和图 6),交流侧灭磁 12

个量,直流侧灭磁5个量。

### 3.5 灭磁电阻

灭磁电阻RV采用SiC非线性电阻,其组件型号为600A-US14-7P-2S(三峡ABB机组用)。

600A-US14-7P-2S灭磁电阻单片参数:外径 $\Phi_1=152\text{ mm}$ ,内径 $\Phi_2=26\text{ mm}$ ,厚度 $\delta=20\text{ mm}$ 。额定容量75 KJ,温升105 K;一次性最大容量90 KJ,温升130 K(环境温度均为25℃)。最大脉冲电流250 A。

### 3.6 灭磁开关

交流侧灭磁模拟试验,采用直流侧灭磁开关MK常开主触头短接,常闭放电触头投灭磁电阻,真空开关QF分断阳极回路。分断时先跳MK开关,MK的常闭辅助接点接通QF的跳闸回路,故QF比MK延迟约40 ms跳闸。直流灭磁开关MK型号DMX2-1600-2/1。真空开关QF型号ZN63A(VS1)-12/630-20。

直流侧灭磁模拟试验,用MK开关分断励磁回路,其常闭放电触头投灭磁电阻。分闸时该触头比常开主触头分断提前2~4 ms闭合。MK型号DMX2-1600-2/1。

### 3.7 试验项目及结果分析

因为本试验目的不考核能量,而研究灭磁工作过程。为了避免在试验中意外损坏设备或试品,采用较小的负载电感 $L=0.3\text{ H}$ (空气芯),及较大的负载电阻 $R_1=0.5\ \Omega$ 。

#### 3.7.1 “逆变”产生的反压峰值大于灭磁电阻全部导通的残压

##### 3.7.1.1 交流侧灭磁

试验回路用图5,合MK和QF,调节 $I_L \approx 450\text{ A}$ ,先实施励磁整流器晶闸管的逆变,然后跳MK和QF。录波图见图7(a)和(b),各录波量及关键时刻均标注在图上。

时刻 $t_1$ 前为正常励磁。 $t_1$ 开始实施逆变,励磁电压 $U_L$ 反向,而且平均值恒定(因为励磁电源他励,取自电网恒定电压)。本次试验逆变电压平均值 $U_{L_{av}}=1.35 U_{ab} \cos\alpha=1.35 \times 857 \times \cos 150^\circ=1\ 002\text{ V}$ ,逆变电压峰值 $U_{LM}=\sqrt{2} U_{ab}=\sqrt{2} \times 857=1\ 212\text{ V}$ ,与图7a标示相符。故此励磁电流 $I_L$ 及 $I_{KA}$ 、 $I_{KB}$ 、 $I_{KC}$ 均线性下降。经过约40 ms,到 $t_2$ 时刻MK开关常闭放电触头接通,而且此时转子电压 $U_L$ 已经高于RV的残压,故转子电流 $I_L$ 立即全部转入RV内流通,开关电流 $I_{KA}$ 、 $I_{KB}$ 、 $I_{KC}$ 均降到零。但此时QF的主触头尚未断开,靠逆变反压换流不彻底(反压不够高且大小波动),故QF多次无弧重燃,经过二十多毫秒,到 $t_3$ 才基本断流。由于操作机构的机械延时, $t_2$ 时刻后再经过约40 ms,到 $t_4$ 时刻QF的主触头才断开,此时断口电压已降到零,开关无电弧开断,断口电压 $U_{KA}$ 、 $U_{KB}$ 、 $U_{KC}$ 分压上升。励磁电流最后在RV内流通衰减,到 $t_5$ 时刻衰减到零。QF在整个开断过程中没有燃弧。

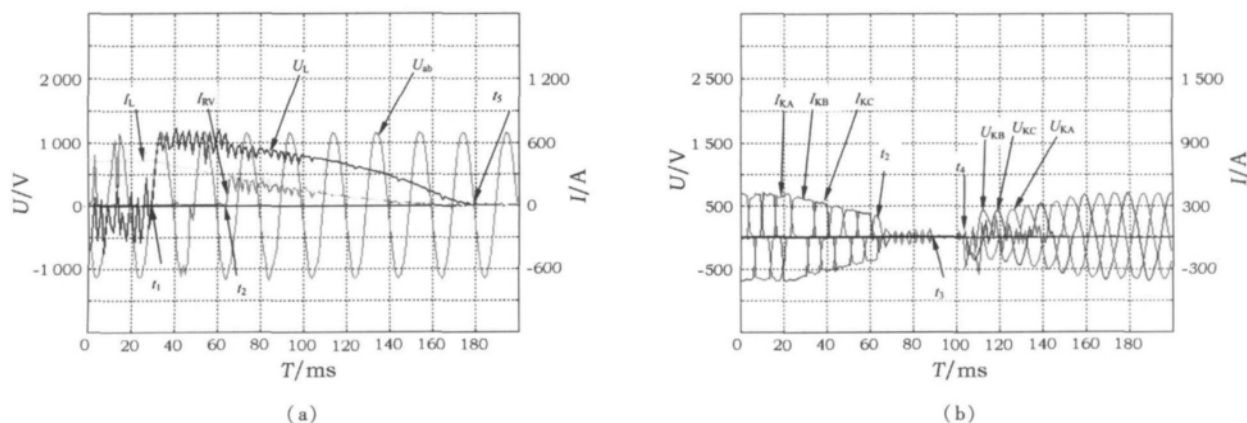


图7 交流侧灭磁逆变试验录波图

### 3.7.1.2 直流侧灭磁

试验回路用图 6,合 MK,调节  $I_k \approx 600\text{ A}$ ,先逆变后跳 MK,录波图见图 8,各录波量及关键时刻均标注在图上。

时刻  $t_1$  前为正常励磁。 $t_1$  时刻逆变,转子电流  $I_L$  下降。到  $t_2$  时刻 MK 开关常闭放电触头接通,转子电流  $I_L$  立即转入 RV 内流通,开关电流  $I_k$  下降到接近零。但此时 MK 的主触头尚未断开,靠逆变反压换流不彻底(反压不够高且大小波动)故 MK 多次无弧重燃,灭磁电阻 RV 部分换流耗能。 $t_3$  时刻 MK 常开触头断开, $t_4$  时刻换流成功, MK 熄弧。 $t_5$  时刻灭磁结束。 $t_4$  后因 MK 熄弧,控制角  $\alpha$  又在逆变区,使整流桥晶闸管全部截止,隔离了阳极电压,故  $U_z = 0$ 。

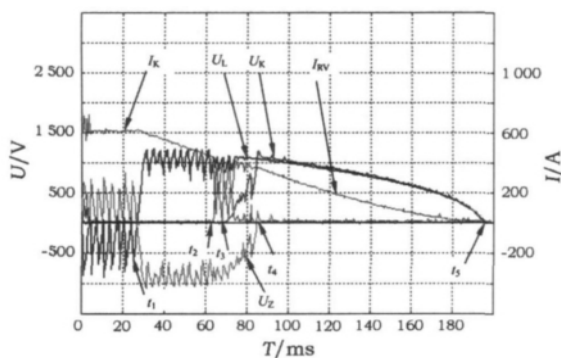


图 8 直流侧灭磁逆变试验录波图

### 3.7.2 “逆变”产生的反压峰值小于灭磁电阻全部导通的残压

#### 3.7.2.1 交流侧灭磁

试验同 3.7.1.1,但电流增大到  $I_L \approx 1\ 040\text{ A}$ ,录

波图见图 9(a) (b) (c)。各录波量及关键时刻均标注在相应的图上。

时刻  $t_1$  以前为正常励磁。 $t_1$  时刻开始逆变,  $U_L$  电压反向,  $I_L$  开始下降。 $t_a$  时刻由于试验设备(晶闸管整流器)的触发脉冲在逆变时移相过快,造成短时触发脉冲紊乱,使 A 相正负极桥臂晶闸管同时导通续流,  $U_L$  降到近于零(2 只晶闸管的导通压降,仅几伏)。 $I_L$  自然衰减。但到  $t_b$  时刻又恢复正常逆变,以后都正常。

$t_a \sim t_b$  时段整流装置工作不正常,其详细工况已经研究清楚。但这一段的工况与本试验无关,也不影响试验的结果。由于重新调整试验设备会耽误很多时间,而且也不太必要,故决定保留本次试验结果,不再重做相同的试验。 $t_a \sim t_b$  时刻的工况分析与本试验无关,故不在此赘述。着重分析后面的灭磁工况。

$t_2$  时刻 MK 常闭触头接通,  $I_{RV}$  开始出现,并根据 RV 的伏安特性随其两端电压  $U_L$  的变化作相应变化。从图 9b 上看到,由于  $I_{RV}$  的分流,从  $t_2$  开始,交流开关的三相电流  $I_{KA}$ 、 $I_{KB}$  和  $I_{KC}$  均有相应下降。但由于  $I_L$  较大,  $U_L$  产生的  $I_{RV}$  不够大(相当电厂事故中阳极电压  $U_a$  降低),故  $I_{KA}$ 、 $I_{KB}$  和  $I_{KC}$  降不到零,不能完成彻底换流。

到  $t_3$  时刻交流开关 QF 三相断口同时分断, +A、-B 两相续流。经过 3.33 ~ 6.66 ms,到  $t_4$  时刻整流桥同相正负极桥臂晶闸管导通续流,  $U_L$  和  $I_{RV}$  下降到近于零,  $I_{KA} = I_{KB} = I_{KC} = 0$ , QF 断口熄弧。 $t_4$  后发电机“续流”灭磁,  $I_L$  按电感回路自身时间常数自然衰减,缓慢下降。这个过程类似图 4。

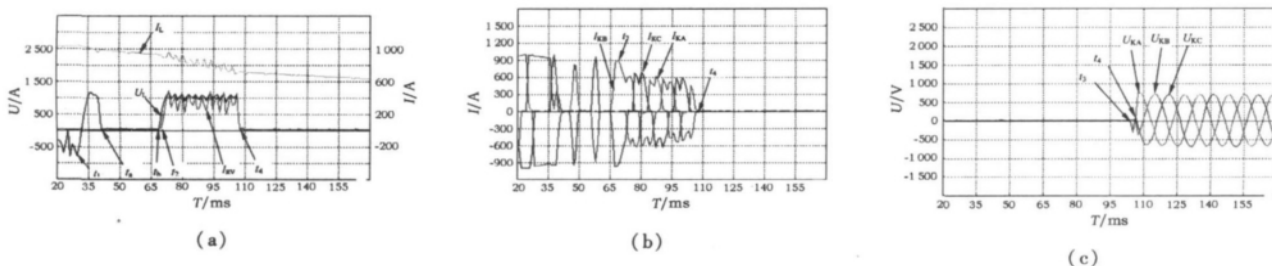


图 9a 交流侧强励灭磁逆变试验录波图

#### 3.7.2.2 直流侧灭磁

同 3.7.1.2,但调节  $I_k \approx 800\text{ A}$ ,先逆变后跳 MK,

录波图见图 10,各录波量及关键时刻均标注在图上。

(下转第 16 页)

由表可见,改绕后,电机的总损耗下降了,尤其减少了杂散损耗,效率提高了将近1.5%。

将旧型电机的定子绕组换成新型的 $\Delta$ -Y绕组,这项技术对已烧毁的电机进行改造最为合适。如果一部完好的旧型电机实施高效 $\Delta$ -Y混合绕组的节能改造,就得拆下原电机完好的绕组,一经拆卸,这套绕组也就报废了,在经济上看来是得不偿失的。

(上接第12页)

各关键时刻同图8,相关说明同3.7.1.2。因电流大,换流困难,开关燃弧时间 $t_3 \sim t_4$ 从16 ms增加到26 ms。

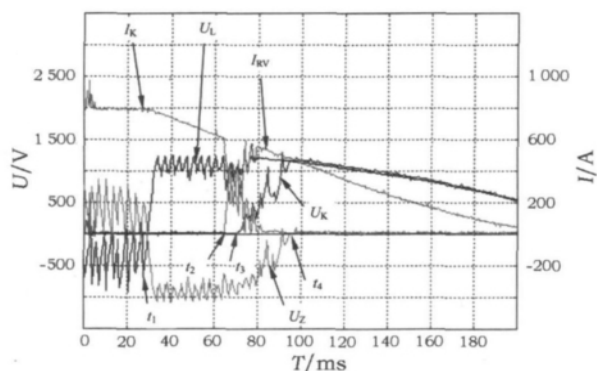


图10 直流侧强励灭磁逆变试验录波图

## 4 结语

4.1 逆变的作用在直流侧灭磁可以和“切脉冲”等效,“逆变”和“切脉冲”一样也能产生反向电压,该电压和磁场断路器的开断弧压同向叠加,帮助换流,降低对磁场断路器弧压的要求;在磁场断路器弧压相同时,可以缩短换流时间,减少断路器弧室和触头的烧损。但如逆变时控制角 $\alpha < 150^\circ$ ,反压峰值就达

但是在制盐、化工等环境腐蚀严重的企业中,电机大修周期很短,只需在维修时将新型的 $\Delta$ -Y绕组装嵌上即可。并且该项技术的实施对高、中级维修电工只需进行72 h的理论、工艺操作培训,是很容易的事。避免了电机功率、安装尺寸、轴径等与主机设备不匹配所带来的麻烦。因而对制盐、化工等企业当前节能降耗,提高经济效益具有很重要的经济意义。

不到阳极电压的峰值,效果不如“切脉冲”。在磁场断路器分断前,逆变造成单向反压,使励磁电流下降;切脉冲造成正负交变电压,使励磁电流波动,平均值不变,在这一点上逆变更有利于换流成功。

4.2 逆变在交流侧灭磁一般不能和“切脉冲”等效,会在交流侧灭磁开关断口断开后3.33~6.66 ms形成整流桥同相正负桥臂晶闸管同时导通续流,使快速灭磁失败。

4.3 如果励磁整流阳极电压特别高(如三峡左岸电站),单靠“逆变”产生的反压就能使灭磁电阻全部导通,完成彻底换流,灭磁开关无电流开断。这时对交直流侧灭磁开关的开断能力及弧压无任何要求,为一种特例。

4.4 逆变帮助灭磁开关换流的作用,依赖于励磁整流电源的交流阳极电压。此电压越高,则帮助作用越明显;如在故障状态或设计取值不同,使阳极电压相对较低,则帮助作用就小。

作者简介:

孟利军,1960年生,女,工程师。毕业于哈尔滨电工学院,工业电气自动化专业。现在哈尔滨电机厂有限责任公司控制设备事业部,从事发电机励磁系统的科研及设计。

· 信息点滴 ·

### 南非需建五座核电站

据南非媒体报道,南非国家核能总公司首席执行官亚当(ROBADAM)最近表示,为满足南非对电力不断增长的需求,南非需要在2030年之前需要新建五座大型核电站,预计所需投资将超过350亿美元。南非第一座也是目前唯一的核电站—库博格(KOE-

BERG)核电站于1984年开始并网发电。其现在的发电量占南非发电总量的6%左右。原本南非曾计划投资1200亿兰特(约合170亿美元)新建第二座核电站,但因全球经济危机的爆发而被迫将该计划暂时搁置起来。随着南非新建核电站的呼声不断高涨,南非已成为国际上核电厂商重点关注的市场。日本东芝、美国西屋和法国的阿海珐公司为了在南非市场上赢得先机,已展开激烈的竞争。 20110202