

# 提高他励式磁控电抗器响应速度的方法

刘海鹏<sup>1,2</sup>, 尹忠东<sup>1</sup>, 李和明<sup>1</sup>, 曹松伟<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 他励式磁控电抗器(SMCR)的励磁及退磁的响应速度均较慢,极大地限制了其应用的范围。介绍了SMCR的结构及工作原理,并分析了影响其响应速度的原因。在此基础上,提出了能有效提高SMCR响应速度的绕组结构,该结构的工作绕组回路中不存在影响工作电流响应速度的直流环流,只要控制电流达到稳定状态,工作电流也进入相应的稳定状态。且在相同的交流工作电压下,改进的SMCR的输出电流与传统SMCR相同。实验验证结果验证了改进结构的合理性和有效性。

**关键词:** 他励式磁控电抗器; 直流环流; 响应速度; 绕组结构; 电流控制; 电抗器

**中图分类号:** TM 47

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.018

## 0 引言

根据我国的国情,发展大电网互联和大容量远距离输电是必然趋势<sup>[1-2]</sup>,近年来,超高压、特高压电网在我国很多地区相继投入运行<sup>[3]</sup>。超高压或特高压大电网的形成及负荷变化加剧,要求大量可调的无功功率源调整电压,维持系统无功潮流平衡,减少损耗,从而提高供电可靠性<sup>[4-5]</sup>。而且为了适应负载的急剧快速变化,无功功率源还应该具有高速响应的特点。

目前应用广泛的动态无功补偿装置是晶闸管控制电抗器(TCR)和晶闸管投切电容器(TSC)<sup>[6-7]</sup>。由于TCR采用相控模式,因此会产生严重的谐波问题<sup>[8]</sup>,并且其与TSC都存在着结构复杂<sup>[9]</sup>、维护费用高、应用在高压场合可靠性差等缺点<sup>[10]</sup>。

基于他励式磁控电抗器(SMCR)的新型动态无功补偿装置,是一种特殊的超高压或特高压并联电抗器<sup>[11-13]</sup>,它能够随着传输功率的变化而自动平滑地调节自身的容量。SMCR以控制策略简单易行和可靠性高的优点,在电力系统超/特高压领域有着广阔的应用前景<sup>[14]</sup>,但其响应速度慢的特点在一定程度上限制了其广泛应用<sup>[15]</sup>。

本文首先分析了SMCR的工作原理及影响其响应速度的本质原因。针对这一原因,通过合理地配置SMCR铁芯上的工作绕组和控制绕组结构,消除影响SMCR响应速度的不利因素,有效提高其响应速度。并可验证,在额定电压下,此改进方法不会影响SMCR的容量。实验验证结果表明本文理论分

析的正确性,提出的绕组结构可以极大地提高SMCR的响应速度。

## 1 SMCR的结构及工作原理

超/特高压SMCR由于容量大,本体通常为三相电抗器组。为便于叙述,本文以其中一相为例进行分析。SMCR中的每一相由2个等截面、等长度的主铁芯和一个等长度的旁轭组成,旁轭截面大于主铁芯截面。每个主铁芯上绕有工作绕组(也称一次绕组)和控制绕组(也称二次绕组)。单相SMCR的一次接线如图1所示。图中, $C_1$ 、 $C_2$ 为主铁芯, $C_3$ 为旁轭; $L_1$ 、 $L_2$ 为电抗器的工作绕组, $L_1$ 、 $L_2$ 上下两端分别并联连接后接入电力系统; $L_5$ 、 $L_6$ 分别为电抗器的控制绕组, $L_5$ 、 $L_6$ 下端串联后,上端接入整流器的输出端<sup>[16]</sup>;工作电源为工频交流电源。

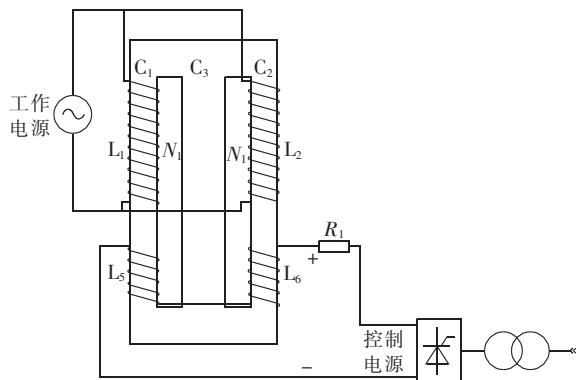


图1 SMCR结构

Fig.1 Structure of SMCR

SMCR的基本工作原理是: $L_5$ 和 $L_6$ 接入如图所示的直流电压后在主铁芯 $C_1$ 、 $C_2$ 中产生方向相反的磁通,其中 $L_5$ 在 $C_1$ 中产生的磁通方向向下, $L_6$ 在 $C_2$ 中产生的磁通方向向上。当工作电压在正半周期时,交流电压在 $C_1$ 中产生的磁通与直流电压产生

收稿日期:2013-05-07;修回日期:2014-04-08

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划研究项目(2007BAA12-B03)

Project supported by the Scientific and Technical Supporting Programs of China during the “11th Five-year Plan” Period (2007BAA12B03)

的磁通方向相反,在  $C_2$  中产生的磁通与直流电压产生的磁通方向相同,因此  $C_2$  便可进入饱和状态, $C_1$  未饱和。此时,绕组  $L_2$  的电抗减小,便有感性电流产生,注入系统补偿无功。当工作电源在负半周期时,交流电压在  $C_1$  中产生的磁通与直流电压产生的磁通方向相同,在  $C_2$  中产生的磁通与直流电压产生的磁通方向相反,因此  $C_2$  未饱和, $C_1$  进入饱和状态。此时,绕组  $L_1$  的电抗减小,便有感性电流产生,注入系统补偿无功。这样,一个工频周期内  $C_1$ 、 $C_2$  轮流饱和,便可向系统注入感性无功,起到无功补偿的作用。

## 2 影响 SMCR 响应速度的机理

SMCR 等效电路见图 2,各铁芯同名端用 \* 号标出。

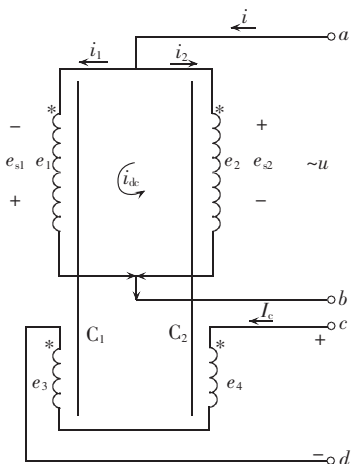


图 2 SMCR 等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of SMCR

当系统需要补偿无功时,SMCR 的控制系统会根据实际需要计算出控制直流电压值。控制直流电压加在控制绕组两端时,便会在控制绕组中产生控制电流  $I_c$ ,在控制电流由零向稳定状态变化过程中,会在 2 个主铁芯的工作绕组与控制绕组中产生感应电动势。设控制电流  $I_c$  的方向从  $c$  端进入,则控制电流  $I_c$  的变化首先在工作绕组中产生感应电动势  $e_{s1}$ 、 $e_{s2}$ ,其中, $e_{s2}$  方向为上正下负, $e_{s1}$  方向为上负下正。 $e_{s1}$ 、 $e_{s2}$  的大小可用式(1)表示。

$$|e_{s1}| = |e_{s2}| = \frac{N_1 N_D S \mu}{2l} \frac{dI_c}{dt} \quad (1)$$

其中, $N_1$  为工作绕组匝数; $\frac{1}{2}N_D$  为控制绕组匝数; $S$  为主铁芯截面积; $\mu$  为铁芯磁导率; $l$  为磁路的长度。 $e_{s1}$ 、 $e_{s2}$  在两工作绕组形成的回路中方向相反,便会产生环流  $i_{dc}$ ,其方向如图 2 所示。当工作电压为正半周期时, $C_2$  饱和,饱和电流  $i_2$  方向自上而下,与环流  $i_{dc}$  方向相反,这阻碍了  $i_2$  快速达到稳定状态;当工作电压在负半周期时, $C_1$  饱和,饱和电流  $i_1$  方向自下而上,与环流  $i_{dc}$  方向相反,这也

阻碍了  $i_1$  快速达到稳定状态。当直流控制电流  $I_c$  达到稳定状态后,虽然此时  $e_{s1}$ 、 $e_{s2}$  等于 0,但当环流  $i_{dc}$  逐渐减小时,在工作绕组回路中会产生阻止  $i_{dc}$  减小的感应电动势,使  $i_{dc}$  不能迅速降为 0。基于此,即使控制电流  $I_c$  已经进入稳定状态,工作电流仍然要持续一段时间才能进入稳态,此为影响 SMCR 响应速度的主要因素。其次,控制电流  $I_c$  从零开始逐渐增大时,控制绕组会产生感应电动势阻止其变化,由于控制绕组匝数很少,因此感应电动势很小,其对 SMCR 响应速度的影响远远小于工作绕组并联所造成的影响。但是,控制绕组中感应电动势的形成,使 SMCR 的控制电流不能瞬间达到稳定值,此为影响 SMCR 响应速度的次要因素。

图 2 中  $e_1$ 、 $e_2$  为交流工作电压产生的感应电动势,当工作电压处于正半周期时, $e_1$ 、 $e_2$  方向均为上正下负,当工作电压处于负半周期时, $e_1$ 、 $e_2$  方向均为上负下正。2 种工作状态下  $e_1$ 、 $e_2$  均大小相等、方向相同,因此在工作绕组形成的回路中不产生环流,对工作电流的响应速度没有影响。

当 SMCR 工作于稳定状态后,工作电流处于正半周期时,分支电流  $i_1$ 、 $i_2$  可表示为:

$$i_1 \approx 0, \quad i_2 = u / (\omega \mu_s N_1^2 S / l) \quad (2)$$

工作电流处于负半周期时,分支电流  $i_1$ 、 $i_2$  可表示为:

$$i_1 = \frac{u}{\omega \mu_s N_1^2 S / l}, \quad i_2 \approx 0 \quad (3)$$

则总电流  $i$  可表示为:

$$i = \frac{u}{\omega \mu_s N_1^2 S / l} \quad (4)$$

其中, $u$  为交流工作电压; $\mu_s$  为饱和磁导率。

并且,当 SMCR 工作于稳定状态后,由于工作电压的周期性交变,会在控制绕组中产生感应电动势  $e_3$ 、 $e_4$ 。设  $\mu_1$  和  $\mu_2$  为同一时刻  $C_1$  和  $C_2$  中的磁导率,则可得:

$$e_3 = \frac{N_1 N_D S \mu_2}{2l} \frac{di_2}{dt} \quad (5)$$

$$e_4 = \frac{N_1 N_D S \mu_1}{2l} \frac{di_1}{dt} \quad (6)$$

此时,控制绕组中控制电流表达式为:

$$I_c = (U_D + e_4 + e_3) / R_1 \quad (7)$$

其中, $U_D$  为直流电压值。由式(7)可见,控制绕组电流并不是纯直流电流,而是叠加了交流分量的直流电流。

## 3 SMCR 响应速度改善措施

通过上述对影响 SMCR 响应速度本质机理的分析,本文提出了如图 3 所示的改进电路结构。

改进电路将图 1 中原工作绕组  $L_1$  分为匝数

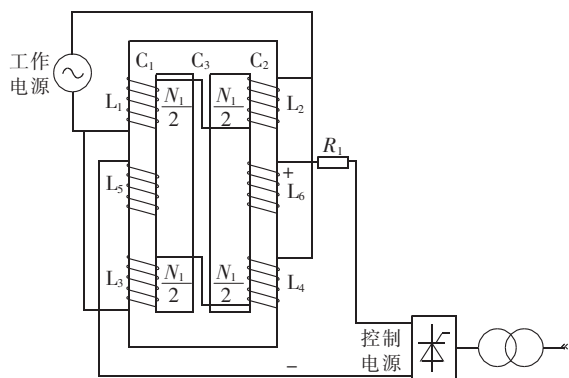


图 3 SMCR 改进电路结构

Fig.3 Improved circuit of SMCR

相等的 2 个绕组  $L_1$  和  $L_3$ , 原工作绕组  $L_2$  分为匝数相等的 2 个绕组  $L_2$  和  $L_4$ 。并且为了让直流控制电压能更平衡均匀地作用于工作绕组, 把控制绕组  $L_5$ 、 $L_6$  移至 2 个主铁芯的中部。工作绕组  $L_1$ 、 $L_2$  位于主铁芯的上部串联连接,  $L_3$ 、 $L_4$  位于主铁芯的下部串联连接。并且绕组  $L_1$  下端与  $L_3$  的下端相连, 然后接入电力系统的一端;  $L_2$  的上端与  $L_4$  的上端相连, 接入电力系统的另一端。改进后的等效电路如图 4 所示。

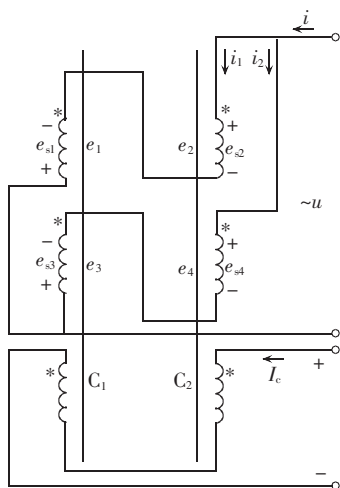


图 4 SMCR 改进电路的等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of improved SMCR

### 3.1 改进电路的工作原理

改进后电路的基本工作原理是: 直流控制绕组中通入如图 4 中所示直流电流后会在两主铁芯中产生方向相反的直流磁通, 其中, 在  $C_1$  中产生的直流磁通方向向下, 在  $C_2$  中产生的直流磁通方向向上。工作电压为工频交流电压, 当工作电压处于正半周期时, 在  $C_2$  中产生的磁通与直流控制电流产生的磁通方向相同, 因此  $C_2$  便可进入饱和状态, 饱和后铁芯的磁导率很小。SMCR 绕组的电感值如式(8)所示, 其中,  $N$  为绕组匝数。

$$L = \frac{N^2 S \mu_s}{l} \quad (8)$$

由式(8)可知, 在此瞬间,  $C_2$  上工作绕组的感抗变得极小, 分压极小, 工作电压几乎全部加在了  $C_1$  的工作绕组上, 此时, 即使  $C_1$  的工作绕组上工作电流产生的磁通同控制绕组产生的磁通方向相反, 工作电压也大到足以使  $C_1$  饱和。因此,  $C_1$  和  $C_2$  同时进入饱和状态, 只是饱和程度不同。当工作电压处于负半周期时, 工作原理同上。

以图 4 为例, 从数学角度进行定量分析。假设每个工作绕组的匝数为  $N_1/2$ , 每个控制绕组的匝数为  $N_D/2$ 。当交流工作电压处于正半周期时,  $C_1$  的磁感应强度为  $B_1$ 、饱和磁导率为  $\mu_{s1}$ ,  $C_2$  的磁感应强度为  $B_2$ 、饱和磁导率为  $\mu_{s2}$ ;  $u'_D$  为直流控制电压,  $R_1$  为控制绕组中的限流电阻,  $u$  为交流工作电压, 可得如下各表达式:

$$i = i_1 + i_2 \quad (9)$$

$$i_1 = i_2 \quad (10)$$

$$B_1 = \left( \frac{1}{2} N_1 i_1 - \frac{1}{2} N_D I_c + \frac{1}{2} N_1 i_2 \right) \mu_{s1} / l \quad (11)$$

$$B_2 = \left( \frac{1}{2} N_1 i_1 + \frac{1}{2} N_D I_c + \frac{1}{2} N_1 i_2 \right) \mu_{s2} / l \quad (12)$$

$$u = \frac{1}{2} N_1 S \frac{dB_1}{dt} + \frac{1}{2} N_1 S \frac{dB_2}{dt} \quad (13)$$

$$u'_D = R_1 I_c + \frac{1}{2} N_D S \frac{dB_2}{dt} - \frac{1}{2} N_D S \frac{dB_1}{dt} \quad (14)$$

通过联立式(9)~(14)可以求出 SMCR 的工作电流  $i$  的表达式为:

$$i = \frac{2}{\mu_{s1} + \mu_{s2}} \left[ \frac{U \cos(\omega t + \pi)}{4 \pi f N_1^2 S} - I_c (\mu_{s1} - \mu_{s2}) \right] \quad (15)$$

当工作电压在负半周期时, 也可用类似的方式求解。

### 3.2 改进电路提高工作电流响应速度的机理

图 4 中, 对于交流工作电压在 4 个工作绕组上产生的感应电动势  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$ 、 $e_4$ , 当工作电压处于正半周期时,  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$ 、 $e_4$  均为上正下负, 当工作电压处于负半周期时,  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$ 、 $e_4$  均为上负下正。2 种工作状态下, 绕组  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  形成的回路中  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$ 、 $e_4$  均互相抵消, 不会产生回路环流, 仍然不会对工作电流的响应速度产生影响。

当需要进行无功补偿, 控制电压加于控制绕组上时, 产生控制电流  $I_c$ , 电流  $I_c$  从 0 上升到稳态的暂态过程会在工作绕组  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  中分别产生感应电动势  $e_{s1}$ 、 $e_{s2}$ 、 $e_{s3}$ 、 $e_{s4}$ , 方向如图 4 中所示。  $e_{s1}$ 、 $e_{s2}$ 、 $e_{s3}$ 、 $e_{s4}$  的大小可用式(16)表示为:

$$|e_{s1}| = |e_{s2}| = |e_{s3}| = |e_{s4}| = \frac{N_1 N_D S \mu}{4L} \frac{dI_c}{dt} \quad (16)$$

则在由  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  组成的工作绕组回路中, 直流感应电动势  $e_{s1}$  与  $e_{s2}$ 、 $e_{s3}$  与  $e_{s4}$  大小相等、方向相

反。因此便有  $e_{s1} + e_{s2} + e_{s3} + e_{s4} = 0$ , 因此在整个工作绕组回路中不存在影响工作电流  $i$  响应速度的直流环流, 即不会影响工作电流的建立速度。此时, 只要控制电流达到稳定状态, 工作电流也即进入相应的稳定状态。

通过上述分析可知, 控制绕组自身所产生的感应电动势对控制电流的阻碍作用成为了影响 SMCR 响应速度的唯一因素。在此基础上, 采取相应的技术措施笔者已在文献[14]中介绍, 这些措施使控制电流在一个工频周期内达到稳定值, 则工作电流的响应时间就可以在 20 ms 以内。

图 4 中, 工作绕组  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  的匝数都为原工作绕组匝数的一半, 并且工作绕组  $L_3$ 、 $L_4$  串联后和串联后的  $L_1$ 、 $L_2$  进行并联。两铁芯饱和后磁导率虽不同, 但差别不大, 假设两磁导率相同, 均为  $\mu$ , 可得:

$$i_1 = i_2 = \frac{u}{2\omega\mu N_1^2 S / l} \quad (17)$$

$$i = i_1 + i_2 = \frac{u}{\omega\mu N_1^2 S / l} \quad (18)$$

式(18)得到的电流大小与式(4)相同。因此, 同样的交流工作电压下, 输出的总工作电流和普通并联电抗器输出工作电流相同, 不会因为绕组的串联连接而变小。

同样, 同式(5)和式(6)的原理可知, 改变工作绕组结构后, 控制绕组电流也不是纯直流电流, 而是叠加了交流分量的直流电流。只是由于绕组结构的变化, 引起控制绕组中感应电压的不同, 使控制电流中的交流分量大小不同, 但均不会对工作绕组的正常工作产生影响, 并且, 可以通过减小控制绕组的匝数来降低控制电流中的交流分量。

## 4 实验结果验证

基于额定值为 380 V/12 A 的 SMCR 进行了相关的实验。实验选择的工作电压有效值为 200 V, 控制电压为直流 15 V, 控制回路电阻选择 10  $\Omega$ 。将电抗器工作绕组在相同的电压条件下分别并联连接和串并连接, 得到的工作电流波形如图 5、6 所示。从图 5、6 中可见, 在工作绕组的 2 种接法下, 磁控电抗器输出工作电流大小相同, 即其工作状

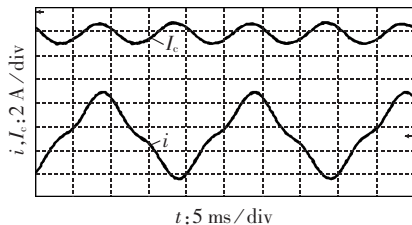


图 5 传统 SMCR 工作电流  
Fig.5 Working currents of traditional SMCR

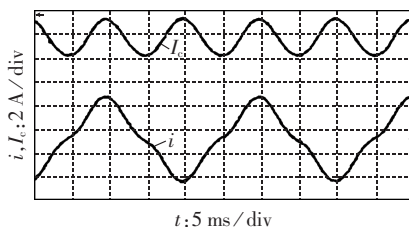


图 6 改进 SMCR 工作电流  
Fig.6 Working currents of improved SMCR

态完全一致。

磁控电抗器串并连接时, 支路电流  $i_1$ 、 $i_2$  波形如图 7 所示。

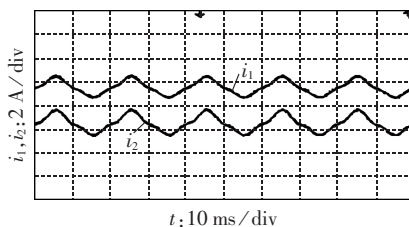


图 7 改进 SMCR 两支路电流  
Fig.7 Branch currents of improved SMCR

在 200 V 交流电压正常工作条件下, 加入励磁控制电压, 工作绕组并联连接和串并连接的波形分别如图 8、9 所示。从图 8 中可见, 工作绕组并联连接时, 当控制电流达到稳定状态后, 工作电流由于环流的影响仍然要经历约 1.4 s 的时间才能达到稳定状态。图 9 中, 由于工作绕组改为了串并连接, 当控制电流达到稳定状态时, 工作电流也即进入稳定状态, 此时, 工作电流从开始到稳定只需经历约 7 个工频周期(约为 0.14 s), 极大地提高了 SMCR 的响应速度。

图 10、11 分别为工作绕组接为并联连接和串并连接时 SMCR 的退磁波形。从图 10 中可见, 并联连接时由于环流的存在严重影响了磁控电抗器

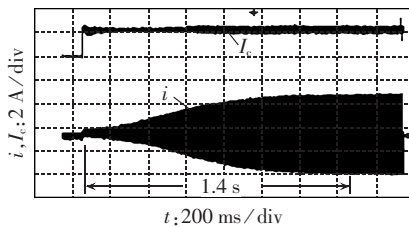


图 8 传统 SMCR 励磁波形  
Fig.8 Excitation waveforms of traditional SMCR

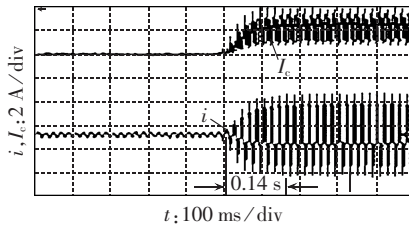


图 9 改进 SMCR 励磁波形  
Fig.9 Excitation waveforms of improved SMCR

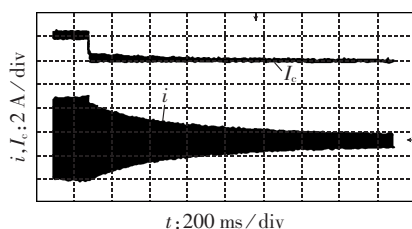


图 10 传统 SMCR 退磁波形

Fig.10 Demagnetization waveforms of traditional SMCR

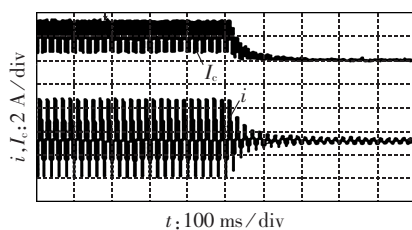


图 11 改进 SMCR 退磁波形

Fig.11 Demagnetization waveforms of improved SMCR

的退磁速度;而由图 11 可见,当控制绕组改为串并连接后,即不存在上述现象,退磁速度大幅加快。

## 5 结论

将现有的 SMCR 工作绕组由并联连接改为串并连接,极大地提高了 SMCR 的响应速度。并且,在同样的交流工作电压下,SMCR 的输出总工作电流和普通并联电抗器输出工作电流相同,不会因为绕组连接方式的改变而减小。在此基础上,通过适当的方法可以使 SMCR 的励磁速度和退磁速度都缩短到一个工频周期内。这样,SMCR 便可应用于电力系统中工况急剧快速变化的情况下,如波动和闪变,为其在电力系统中的应用奠定了良好基础。

## 参考文献:

[1] 丁剑,张文朝,卜广全,等. 大规模风电接入下的河西走廊远距离大容量输电[J]. 高电压技术,2009,35(8):2037-2041.  
DING Jian,ZHANG Wenchao,BU Guangquan,et al. Long distance and huge capacity transmission of Gansu corridor under large-scale wind power integration circumstance[J]. High Voltage Engineering,2009,35(8):2037-2041.

[2] 丁理杰,杜新伟,周惟婧. SVC 与 STATCOM 在大容量输电通道上的应用比较[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(24):77-81.  
DING Lijie,DU Xinwei,ZHOU Weijing. Comparison of application of SVC and STATCOM to large capacity transmission path of power system[J]. Power System Protection and Control,2010,38(24):77-81.

[3] 吴耀文,马溪原,方华亮,等. 大规模风电特高压专用通道落点优选方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(1):9-16.  
WU Yaowen,MA Xiyuan,FANG Hualiang,et al. Selection method of optimal access point for large scale wind power

transmission UHV corridor[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(1):9-16.

[4] 何仰赞,温增银,汪馥瑛. 电力系统分析[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1996:25-27.

[5] 刘振亚. 特高压交流输电技术研究成果专辑(2005 年)[M]. 北京:中国电力出版社,2006:6-9.

[6] 吴传平,罗安,涂春鸣,等. 高压配电网谐波及无功综合动态无功补偿系统研究[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):17-22.  
WU Chuanping,LUO An,TU Chunming,et al. Control scheme of integrated dynamic compensation system for HV power distribution grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(4):17-22.

[7] 浣威,涂春鸣,程莹,等. 高压配电网电能质量综合补偿系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(4):76-81.  
HUAN Wei,TU Chunming,CHENG Ying,et al. Power quality compensation system of high voltage distribution grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(4):76-81.

[8] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,1998:172-173.

[9] 王成福,梁军,张利,等. 基于静止同步补偿器的风电场无功电压控制策略[J]. 中国电机工程学报,2010,30(25):23-28.  
WANG Chengfu,LIANG Jun,ZHANG Li,et al. Reactive power and voltage control strategy for wind farm based on STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(25):23-28.

[10] 周丽霞. 大容量输电长线路可控并联补偿与潜供电弧抑制的研究[D]. 保定:华北电力大学,2009.  
ZHOU Lixia. The controllable shunt compensation and secondary arc suppression for large capacity long transmission line[D]. Baoding:North China Electric Power University,2009.

[11] 邱昂,余梦泽. 新型 110 kV 磁控电抗器的监控系统研制[J]. 高压电器,2010,46(6):69-73.  
QIU Hao,YU Mengze. Supervisory control system of a novel 110 kV magnetically controlled reactor[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(6):69-73.

[12] 姚尧,陈柏超,田翠华. 磁控电抗器在右江 500 kV 线路中的应用[J]. 高电压技术,2008,34(5):984-988.  
YAO Yao,CHEN Baichao,TIAN Cuihua. Application of magnetically controlled reactor in 500 kV transmission line from Sanyou to Jiangling[J]. High Voltage Engineering,2008,34(5):984-988.

[13] LIANG Yanping,ZHANG Fang,ZHANG Haiting,et al. Leakage inductance calculation and simulation research of extra-high voltage magnetically controlled shunt reactor[C]//2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering(MACE). Wuhan,China:IEEE,2010:4025-4028.

[14] 王轩,邓占锋,于坤山,等. 超高压磁控式并联电抗器稳态特性[J]. 中国电机工程学报,2008,28(33):104-109.  
WANG Xuan,DENG Zhanfeng,YU Kunshan,et al. Steady-state characteristics of extra-high voltage magnetically controlled shunt reactor[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(33):104-109.

[15] 余梦泽. 新型并联磁控电抗器发展及应用[J]. 高压电器,2010,46(11):77-81.  
YU Mengze. Development and application of the novel shunt

- [13] 文明浩,陈德树. 小矢量算法浅析[J]. 电力系统自动化,2003,27(5):42-44.  
WEN Minghao, CHEN Deshu. Simple analysis of phaselet algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(5):42-44.
- [14] 王家林,夏立,吴正国,等. 采用改进 Prony 算法的电力系统故障暂态信号分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):89-93.  
WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. Power system harmonic state estimation based on generalized ridge estimation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7):89-93.
- [15] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [16] BUSHUEV O, IBRYAEVA O. Choosing an optimal sampling rate to improve the performance of signal analysis by Prony's method[C]//2012 35th International Conference on Telecom-

munication and Signal Processing. Prague, The Czech Republic: IEEE, 2012:634-638.

#### 作者简介:



任龙飞

任龙飞(1989-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:ren.longfei@qq.com);  
郝治国(1976-),男,内蒙古鄂尔多斯人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护及电力系统建模与仿真等;  
张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士,从事电力系统继电保护、安全自动装置、电力系统通信等方面的研究工作。

## Improved Prony algorithm against transient CT saturation for relay protection

REN Longfei<sup>1</sup>, HAO Zhiguo<sup>1</sup>, ZHANG Baohui<sup>1</sup>, WANG Xiaoli<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Ningxia Power Dispatch Centre, Yinchuan 750001, China)

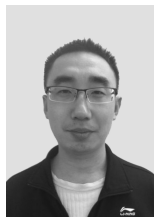
**Abstract:** The transient CT(Current Transformer) saturation may cause the malfunction of relay protection, for which an improved Prony algorithm is proposed. In order to improve the calculation accuracy and decrease the calculation load in short data window, it sets the eigenvalues corresponding to 50 Hz, adopts SVD(Singular Value Decomposition) to reduce the order and acquires data with the sampling frequency nearest to the optimal one. Data of transient CT saturation experiments and calculative results based on actual fault recording data demonstrate that, the useful information of faulty currents can be quickly extracted out by the proposed algorithm only based on the unsaturated section of CT secondary current in short data window. Results of case simulation also show that, the proposed algorithm guarantees the proper operation of relay protection during fault transfer.

**Key words:** current transformer; transient saturation; Prony algorithm; short time window; relay protection

(上接第120页 continued from page 120)

- magnetically controllable reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11):77-81.
- [16] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器理论及应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,1999:41-45.
- [17] 刘海鹏,尹忠东,赵士硕. 磁控电抗器快速性研究[J]. 电力电子技术,2013,47(1):15-17.  
LIU Haipeng, YIN Zhongdong, ZHAO Shishuo. Research on the quickness of magnetically controlled reactor[J]. Power Electronics, 2013, 47(1):15-17.

#### 作者简介:



刘海鹏

刘海鹏(1982-),男,山西晋中人,博士研究生,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail:liuhaipeng\_2005@163.com);

尹忠东(1968-),男,江西井冈山人,教授,博士,主要从事 FACTS、电能质量与高压技术方面的教学、研究工作。

## Improvement of SMCR response

LIU Haipeng<sup>1,2</sup>, YIN Zhongdong<sup>1</sup>, LI Heming<sup>1</sup>, CAO Songwei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The excitation and demagnetization responses of SMCR(Separate excitation Magnetic Control Reactor) are slow, which limits its application. The structure and working principle of SMCR are introduced and the factors influencing its response are analyzed. An improved winding structure of SMCR is proposed to eliminate the DC circulation in its working winding loop, which effectively enhances the response of its working current. The working current reaches the stable status if once the control current is stable. The improved SMCR has the same output current of the traditional SMCR under the same AC working voltage. The experimental results verify that the structural improvement is rational and effective.

**Key words:** SMCR; DC circulation; response speed; winding structure; current control; electric reactors