

适用于用户侧的无触点分级有载电压调节器的设计

江友华, 曹以龙, 唐忠

(上海电力学院计算机与信息工程学院, 上海 200090)

摘要: 为了确保用户的供电电压质量, 设计了一种适用于用户侧的无触点分级有载电压调节器, 研究了其调压策略, 重点对环流的产生机理进行了数学分析和推导, 并计算出无暂态过程的晶闸管触发时刻, 为相关产品设计提供了理论依据。通过实验及仿真可知, 本装置具有调压精度高, 响应快等特点, 且由于有效抑制了环流, 克服了分接头切换时刻的电流冲击。

关键词: 无触点交流调压; 环流; 晶闸管

Design of no-contact AC voltage regulator which is fit to user

JIANG You-hua, CAO Yi-long, TANG Zhong

(School of Computer and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Industry product quality and human life will be affected by abnormal voltage. Based on this, firstly a no-contact tap changer AC voltage regulator is designed, its voltage control strategy is researched, and principle of circle current is emphatically analyzed and deduced by mathematic. At the same time, SCR trigger moment during transient process is calculated and the result can be provided to other correlative products as the theory. Secondly, the device has high precision and quick response, and current impulse can be overcome because circle current is little. Finally, the experiment and simulation results demonstrate the feasibility of the theory analysis.

Key words: no contact AC voltage regulator; circle current; SCR

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)03-0104-06

0 引言

由于我国电力发展严重滞后于国民经济其他部门的发展, 电力供给满足不了工农业生产的需要, 会出现供电电压不稳的现象^[1-3]。为此, 在市场上出现了多种调压装置, 但大多数为机械式有触点开关。这种开关不仅切换时伴有电弧的产生, 机械触头容易损坏, 而且调节速度慢, 不能频繁操作。目前, 也有用电力电子器件构成的无触点交流调压装置, 但是由于没有很好地克服环流, 在切换构成中容易形成大电流冲击, 可靠性不高。此外, 由于主电路不尽合理, 从而使得调压精度也不高^[4-5]。基于此, 本文设计了一款适用于用户侧的无触点分级有载电压调节器, 采用新型主电路拓扑及调压策略, 调压精度得到大大提高。最大特点是采用了合理切换时刻, 克服了环流, 减少了切换时的电流冲击, 提高了装置的可靠性。

基金项目: 上海市教委一般项目(10Y2162); 上海市重点科技攻关计划(08160510600)

1 交流调压补偿原理

无触点分级有载电压调节器原理如图1所示, 由图1可知:

$$U_o = U_i \pm \Delta U \quad (1)$$

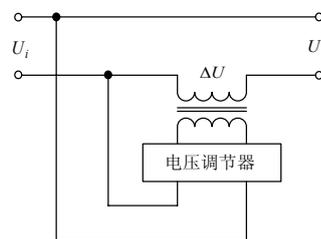


图1 交流稳压器原理框图

Fig.1 Block diagram of AC voltage regulator

根据式(1)可得图2所示的矢量叠加示意图, 按照余弦定理可得:

$$U_o = (U_i^2 + \Delta U^2 + 2U_i \Delta U \cos \alpha)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式(2)中: α 是 U_i 与 ΔU 之间的夹角。

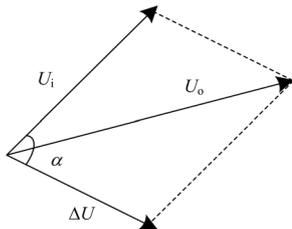


图2 电压矢量叠加原理

Fig.2 Superposition principle of voltage vector

由式(2)可知, 调节补偿电压 ΔU 的大小或者同输入电压 U_i 的夹角, 就可以调节输出电压 U_o 的大小和相位。通常情况是调节补偿电压 ΔU 的大小, 而相位要么同输入电压 U_i 同相位, 或者反相位, 从而维持电压 U_o 不变。因此, 该电压调节器只补偿输入电压 U_i 升高或跌落部分, 而无需承担负荷所需的全部电压, 因此稳压器承担的最大功率仅为负载功率的 20% (假设电压补偿范围为 20%)。又因为是叠加式电压补偿, 不产生额外谐波, 功率因数高。此外, 由于功率器件不是直接串在系统主回路中, 器件选型较容易^[2]。

2 用户侧无触点分级有载电压调节器

目前市场上用于调节电压的交流稳压器拓扑结构比较多, 但由于各种不足, 存在动态响应慢、精度不高以及可靠性的问题。基于此, 本文设计和

构建出一款适合于用户侧无触点分级有载电压调节器, 它继承上述调压装置的优点, 又克服了其缺点。其主电路拓扑如图3所示。它主要由调节变压器 T1、补偿变压器 T2、双向晶闸管调节电路以及短接电路四部分组成。其中调节变压器 T1 的原边接 10 kV 配电网输出端, 副边有多个抽头, 分别为 5 V、15 V、10 V, 同名端用“•”标注; 补偿变压器 T2 的原、副边匝比为 1:1, 主要起到升压、隔离作用; 双向晶闸管调节电路由 SCR1~SCR8、FUSE1~FUSE8 组成, 其中双向晶闸管是用来切换分接头, 用于提供不同的补偿电压, 其两端并联有阻容吸收电路, 防止瞬态尖峰电压击穿双向晶闸管, 快速熔断器 FUSE1~FUSE8 是保护元件, 防止过流故障损坏双向晶闸管。短接电路由 SCR9 和限流电抗器 L_9 组成, 其功能是当双向晶闸管调节电路处于故障时, 为补偿变压器 T2 的副边提供一个回路, 防止补偿变压器开路。图中: U_i 表示输入电压; i_1 是输入电流; U_o 表示输出电压; i_2 是输出电流; U_1 表示补偿变压器 T2 原边电压; U_2 表示补偿变压器 T2 副边电压; i_3 是补偿变压器 T2 原边电流。

根据输入电压特性及相应的算法, 控制不同的双向晶闸管的通断, 从而可切换调节变压器 T1 抽头, 改变串联补偿变压器 T2 补偿电压的大小和极性, 达到稳定输出电压的目的。其具体对应关系如表 1 所示。

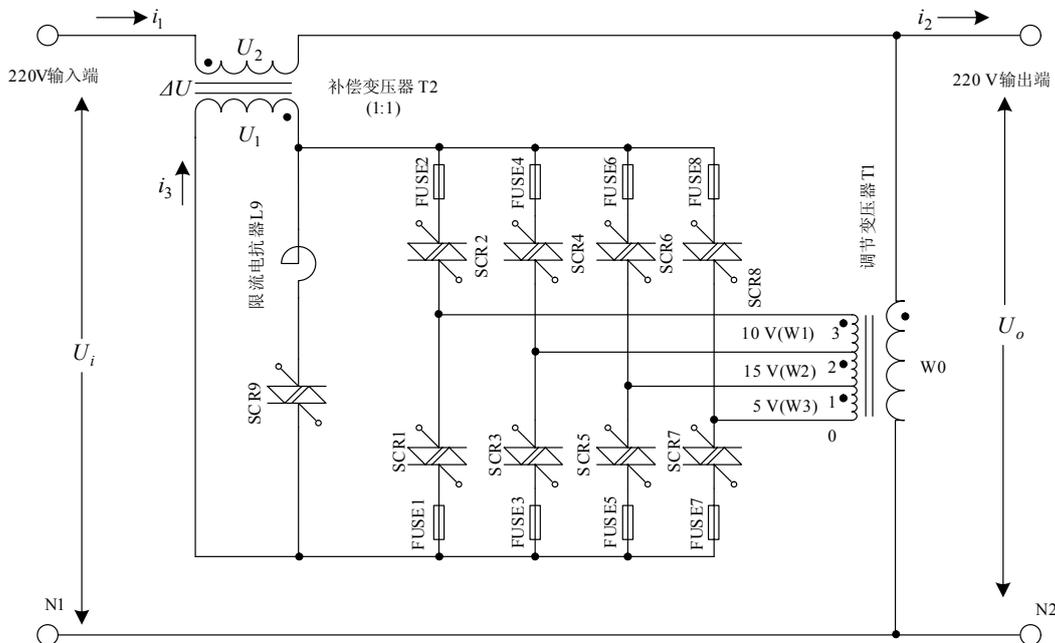


图3 用户侧无触点分级有载电压调节器主电路拓扑

Fig.3 Main circuit topology of no-contact on-load voltage regulator

从表 1 可以看出, 输入电压 U_i 波动范围 $\pm 15\%$, 经过无触点分级有载电压调节器补偿后, 输出电压

U_o 的波动范围却只有 $0\sim 2.5\%$; 另外还可以看出, 无触点分级有载电压调节器补偿电压分为 13 档, 每

档 2.5%，因而补偿电压的精度也比较高。

表 1 双向晶闸管切换开关状态与补偿电压

Tab.1 The compensator voltage corresponding to switch state of bidirectional SCR

输入端 U_i 检测 电压范围 / V	对应触发的 晶闸管编号	补偿电压 / V	输出端 U_o 电压范围 / V
$250 < U_i \leq 255$	SCR7、SCR2	1 档 (-30)	$220 < U_o \leq 225$
$245 < U_i \leq 250$	SCR5、SCR2	2 档 (-25)	$220 < U_o \leq 225$
$240 < U_i \leq 245$	SCR7、SCR4	3 档 (-20)	$220 < U_o \leq 225$
$235 < U_i \leq 240$	SCR5、SCR4	4 档 (-15)	$220 < U_o \leq 225$
$230 < U_i \leq 235$	SCR3、SCR2	5 档 (-10)	$220 < U_o \leq 225$
$225 < U_i \leq 230$	SCR7、SCR6	6 档 (-5)	$220 < U_o \leq 225$
$215 < U_i \leq 225$	SCR _k 、SCR _{k+1} ($k=1,2,\dots,7$)	7 档 (0)	$220 < U_o \leq 225$
$210 < U_i \leq 215$	SCR6、SCR7	8 档 (+5)	$215 < U_i \leq 220$
$205 < U_i \leq 210$	SCR2、SCR3	9 档 (+10)	$215 < U_i \leq 220$
$200 < U_i \leq 205$	SCR4、SCR5	10 档 (+15)	$215 < U_i \leq 220$
$195 < U_i \leq 200$	SCR4、SCR7	11 档 (+20)	$215 < U_i \leq 220$
$190 < U_i \leq 195$	SCR4、SCR7	12 档 (+25)	$215 < U_i \leq 220$
$185 < U_i \leq 190$	SCR2、SCR7	13 档 (+30)	$215 < U_i \leq 220$

3 无触点电压调节器环流产生机理及切换时刻的选取

3.1 环流产生机理

由图 3 主电路拓扑和原理可知，在不同分接头进行切换时，通常是开通需要导通的晶闸管，后关断原先导通的晶闸管（因为电压先电流过零）。但是由于晶闸管不是理想的电力电子器件，存在开通和关断时间，因此在切换过程中，就存在两个晶闸管同时导通的现象。例如正补偿 15 V 时，SCR4、SCR5 导通，切换到补偿 10 V 时，此时 SCR2，SCR3 导通，这样，在切换的暂态时刻将产生环流，此时环流流动方向为调节变压器 T1 的抽头 3—SCR2—FUSE2—FUSE4—SCR4—调节变压器 T1 的抽头 2^[6-7]。因此有必要对环流产生的机理及大小进行深入分析，以便在设计软、硬件时，采取合适的算法或结构来克服或者避免这个暂态的过渡过程，保护晶闸管不受损坏。

现假定调节变压器 T1 二次侧的电流和电压的关系如图 4 所示，图中 φ 为变压器功率因数角，在实际运行中 $0.2 < \cos\varphi < 0.95$ ，即 $18.2^\circ < \varphi < 78.5^\circ$ 。

由图 3 可知，正常工作时，上半部和下半部的晶闸管有且只有一个是导通的。当采用直接变换法改变分接头时，原关断的晶闸管先导通，然后原导通的晶闸管才关断，所以改变分接头时，在这两个双向晶闸管及其所连接的绕组中间将产生环流。它

可通过图 5 的等效电路来计算。图中 L_{w1} 和 R_{w1} 分别为调节变压器每一段调节绕组的漏电感和电阻， U_{x1} 为变压器该段调节绕组的电压。

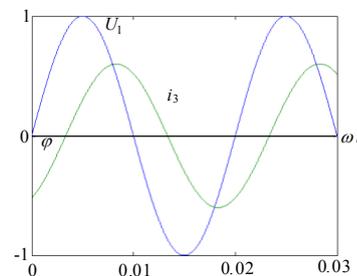


图 4 电压电流相位示意图

Fig.4 Sketch of voltage and current phase position

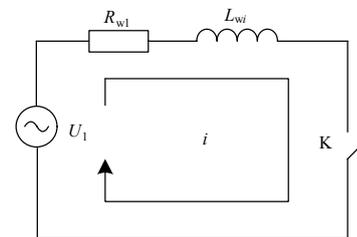


图 5 绕组环流等效电路

Fig.5 Equivalent scheme of winding circle current

图中每段调节绕组 W_i ($i=1,2,3$) 的电感，电抗和电阻分别如下：

$$L_{w_i} = 0.0054 \text{ H}, \quad X_{w_i} = 2.1 \text{ } \Omega, \quad R_{w_i} = 0.94 \text{ } \Omega$$

设配电网输入电压 210 V，输入电流 5 A，输出

电压为 220 V, 则调节变压器调节绕组瞬时电压为

$$U_{x1} = 10 \sin(\omega t) \quad (3)$$

通过双向晶闸管的瞬时电流为

$$i_3 = 1.414 \times 5 \sin(\omega t - \phi) \quad (4)$$

式中: ϕ 是调节变压器二次侧的功率因数角, 最大值 $\phi_{\max} = 78.5^\circ$, 最小值 $\phi_{\min} = 18.2^\circ$ 。

当输入电压低于允许值时, 控制器在 $U_i=0$ 时刻给 SCR4 施加控制电压, 它立即导通, 随之撤消 SCR2 的控制电压, 但它并不立刻关断, 而是在电流过零时关断。令 SCR4 导通时刻 $t=0$, 则从 $t=0$ 时刻起, 到 SCR4 电流过零而关断时刻这段时间在 W_1 绕组于 SCR2、SCR4 构成的回路中产生环流。此电流相当于图 3 中开关 K 在 $t=0$ 时闭合, 在电源电压 $U_{x1}=10\sin(\omega t)$ 作用下产生的电流。

图 5 中, 回路电压方程为

$$10 \sin(\omega t) = R_{w1} i + L_{w1} \frac{di}{dt} \quad (5)$$

式 (5) 的解为

$$i = i' + i'' \quad (6)$$

式中: i' 为回路电流的稳态分量。

$$i' = \frac{Um}{\sqrt{R_{w1}^2 + X_{w1}^2}} \sin(\omega t - \tan^{-1} \frac{X_{w1}}{R_{w1}}) = \frac{10}{\sqrt{0.94^2 + 2.1^2}} \sin(\omega t - \tan^{-1} \frac{2.1}{0.94}) = 4.35 \sin(\omega t - 65.88^\circ) \quad (7)$$

式中: i'' 为回路电流的暂态分量

$$i'' = Ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

式中: τ 为环流回路的时间常数

$$\tau = \frac{L_{w1}}{R_{w1}} = \frac{0.0054}{0.94} = 0.0057 \text{ s} = 5.7 \text{ ms} \quad (9)$$

所以

$$i = i' + i'' = 4.35 \sin(\omega t - 65.88^\circ) + Ae^{-\frac{t}{0.0057}} = 4.35 \sin(\omega t - 65.88^\circ) + Ae^{-175.43t} \quad (10)$$

式 (10) 中的 A 与变换分接头前功率因数角 ϕ 和电流值有关, 若 $\phi = \phi_{\max} = 78.5^\circ$, 因为 $t = 0$ 时,

$$i = -1.414 \times 5 \sin(78.5^\circ) = -6.93(\text{A}) \quad (11)$$

所以

$$\begin{aligned} -6.93 &= -4.35 \sin 65.88^\circ + A \\ A &= -2.96 \end{aligned} \quad (12)$$

因此

$$i = 4.35 \sin(\omega t - 65.88^\circ) - 2.96e^{-175.43t} \quad (13)$$

根据式 (14) 画出的电流波形如图 6 所示。

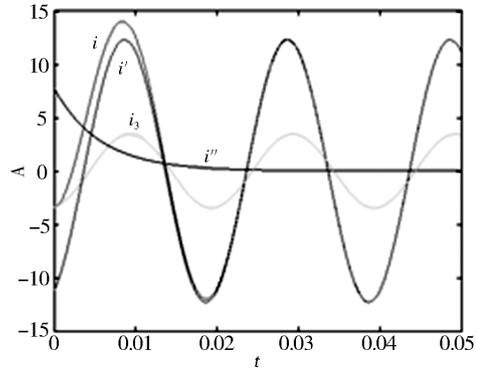


图 6 暂态电流示意图

Fig.6 Sketch of transient current

图 6 中表示 SCR4 闭合而 SCR2 未断开时, 该闭合回路的电流变化曲线, 其中 i 是环流瞬时值, i' 是环流的稳态分量, i'' 是环流的暂态分量, i_3 是正常工作电流。由图可见, 在 $t = 0$ 的切换过程中, 环流瞬时值达到正常值的 3 倍左右, 因此有必要采取适当措施来减小这个环流。

3.2 分接头切换时刻的选取

无触点头级有载电压调节器的一个控制难点和关键问题是需要注意匝间短路, 防止环流。也就是说调压过程中往往出现一种晶闸管组互斥现象。即当一对反并联的晶闸管开关导通时, 另一对反并联的晶闸管开关同时关断。然而晶闸管并不是理想器件, 其存在关断时间, 当上一组晶闸管还未完全关断的时候(例如图 3 中的 SCR2), 下一组晶闸管已经开通(例如图 3 中的 SCR4), 这样就在调节变压器的抽头 3、2 匝间形成短路, 从而损坏晶闸管及调节变压器。因此必须选取合适的触发时刻来防止暂态短路电流, 下面将对此问题进行分析和推导。

由图 5 可知, 回路电压方程为

$$U_{x1} \sin(\omega t) = R_{w1} i + L_{w1} \frac{di}{dt} \quad (14)$$

$$\text{即: } U_{x1} \sin(\omega t) = R_k i + L_k \frac{di}{dt}$$

式中: $R_k = R_{w1}$; $L_k = L_{w1}$ 。

对式 (14) 进行拉普拉斯变换得

$$U_{x1}(s) = I(s)(R_k + sL_k) - L_k i(0) \quad (15)$$

解式 (15) 可得

$$I(s) = \frac{U_{x1}(s) + L_k i(0)}{R_k + sL_k} \quad (16)$$

又因为 $U_{x1}(s) = U_{x1m} \frac{s}{s^2 + \omega^2}$, 将其代入式 (16) 得

$$I(s) = \frac{s^2 L_k i(0) + s U_{x1m} + \omega^2 L_k i(0)}{(s^2 + \omega^2)(R_k + sL_k)} \quad (17)$$

对式 (17) 进行拉普拉斯反变换得

$$i(t) = \frac{U_{x1m}}{|Z_k|} \sin(\omega t - \alpha) + [i(0) + A] e^{-\frac{R_k t}{L_k}} \quad (18)$$

其中: $\alpha = \arctan(\frac{\omega L_k}{R_k})$; $A = \frac{U_{x1m}}{|Z_k|} \sin(\alpha)$;

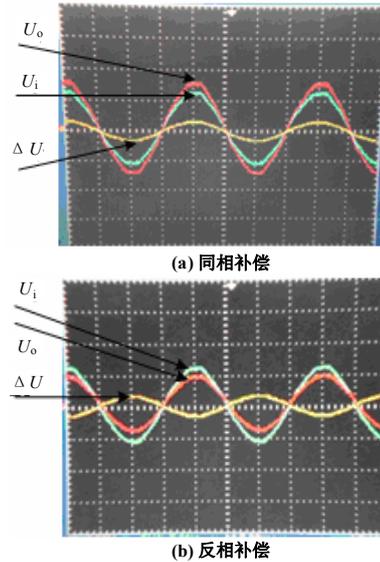
$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + (\omega L_k)^2}。$$

要使切换时无暂态冲击电流, 应使 $i(t)$ 尽可能地小, 甚至为零, 因此由式 (18) 可知晶闸管切换时刻为 $\alpha = \arctan(\frac{\omega L_k}{R_k})$ 。

4 实验

本装置在 220 V 单相样机上进行实验。实验装置容量为 10 kVA, 补偿级数为 7 档, 分别补偿电压级别为 +30、+20、+10、0、-10、-20、-30。其中调节变压器 T1 和补偿变压器容量均为 1.8 kVA, 晶闸管 SCR1—SCR8 选择 50 A、1 000 V 的固态继电器。

图 7 为实验波形, 其中图 7 (a) 为同相补偿的波形图, 此时输入电压为 200 V, 正相补偿电压为 19 V; 图 7 (b) 为反相补偿的波形图, 此时输入电压为 239 V, 反相补偿电压为 20 V。由图 7 还可以看出, 由于固态继电器在电压过零点才开通或关断, 其补偿电压为正弦波, 所以输出电压谐波含量少。表 2 为实验所测得的一组数据, 分别是输入电压 U_i 、输出电压 U_o 、串联补偿变压器原边电压 U_2 、副边电压 U_1 、输入输出功率 P_i 、 P_o 、效率 η 等数值及它们之间的相互关系。从表 2 可以看出, 其电压、电流数值反映了其功率流的流向, 验证了上述功率流分析的正确性, 另外从其效率参数也可以看出, 这种无触点分级有载电压调节器的效率比较高, 符合节能型社会的要求。另外从表 2 还可以看出, 无论输入电压怎样变化 (此装置为输入电压最大波动范围为 $\pm 20\%$), 均可以保证输出电压在 220 V 范围左右, 而不受输入电压波动的影响, 从而使得输出电压质量得到提高。



(纵坐标: 200 V/格; 横坐标: 5 ms/格)

图 7 实验波形

Fig.7 Experiment waveform (X:200V/div; Y:5ms/div)

表 2 无触点分级有载电压调节器电压对应关系

Tab.2 Relation of no-contact on-load voltage regulator

U_i/V	U_o/V	i_1/A	i_2/A	i_3/A	P_i/W	P_o/W	$\eta/\%$
201	219	8.58	7.63	1.54	1 724.6	1 671.0	96.9
213	222	8.22	7.72	1.41	1 750.9	1 713.8	97.9
220	218	7.70	7.62	1.26	1 694.0	1 661.2	98.1
229	219	7.44	7.64	1.18	1 703.8	1 673.2	98.2
239	218	7.15	7.58	1.12	1 708.9	1 652.4	96.7

5 结论

适用于用户侧的无触点分级有载电压调节器是基于变压器有载调压和现有交流稳压技术而改进的一种用于调节电压的装置, 它克服了两者的缺点, 又继承了两者的优点, 具有调压精度高, 动态响应快的特性, 特别适用于对电压稳定度要求比较高的用户。此外, 由于晶闸管不是理想器件, 存在关断时间, 在不同分接头之间进行切换的时候, 存在共同导通时刻, 致使有环流产生。基于此, 文中对环流的产生机理进行了数学分析和推导, 并计算出无暂态过程的晶闸管触发时刻, 从而有效地克服了环流, 减少了不同分接头之间切换时的电流冲击。

参考文献

[1] 李晓民. 连通拓扑组合状态有载调压原理与应用研究 (博士学位论文)[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
LI Xiao-min. The Principle and Application Research of Connectivity Structure and Assemble State in On-load Voltage Regulator, Doctoral Dissertation[D]. Wuhan:

- Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [2] 刘凤君. 市电电能质量补偿技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- LIU Feng-jun. The Compensator Technology of Power Energy Quality[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [3] Ming Tsung Tsai. Design of a Compact Series-Connected AC Voltage Regulator with an Improved Control Algorithm[J]. Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(4): 933-936.
- [4] Faiz J, Siahkollah B. New Solid-state on Load Tap-changers Topology for Distribution Transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(1): 136-141.
- [5] 陈将. 无触点大功率补偿式交流稳压电源的研究(硕士学位论文)[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- CHEN Jiang. The Research of No-contact High Power Compensator AC Stabilized Voltage Supply, Thesis[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [6] 李晓明, 黄俊杰, 尹项根, 等. 平滑无冲击电力电子有载调压装置[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 45-48.
- LI Xiao-ming, HUANG Jun-jie, YIN Xiang-gen, et al. Smooth and Impactive Power Electric On-load Voltage Regulator Device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 45-48.
- [7] 刘世琦, 皮伟才, 李晓明, 等. 互斥晶闸管组通断控制方法在OLTC中的应用[J]. 高压电器, 2005, 41(5): 360-362.
- LIU Shi-qi, PI Wei-cai, LI Xiao-ming, et al. The Make-and-break Control Method of Mutually Exclusive SCR in OLTC[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(5): 360-362.

收稿日期: 2009-03-06; 修回日期: 2009-04-01

作者简介:

江友华(1974-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用. E-mail: jyhua0306@sina.com

(上接第 80 页 continued from page 80)

PSS 投入以抑制机组在扰动后的低频振荡是必要的。

5) 从图 3 所示的 PSS 传递函数的构造当中, 我们不难可以分析看出, 这种有功型 PSS 存在反调(无功及励磁随原动机功率变化) 是不可避免的现象。

针对有功型 PSS 无功反调现象, 提出以下对策:

- 1) 在机组启动程序跳闸时, 自动将 PSS 退出运行。
- 2) 在出现 RUNBACK 时, 将 PSS 退出。
- 3) 考虑采用加速功率型 PSS。

(上接第 103 页 continued from page 103)

- [16] 马以春. 蓄电池综合性能测试系统的研制[J]. 电源技术, 2005, 29(1): 46-48.
- MA Yi-chun. Develop Test System of Comprehensive Performance or Storage Battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2005, 29(1): 46-48.
- [17] 陈朋朋, 郭忠文, 潘洪华, 等. 电力监测软件系统核心构件设计与实现[J]. 计算机应用, 2008, 28(6): 366-368.
- CHEN Peng-peng, GUO Zhong-wen, PAN Hong-hua, et al. The Design and Application of Software to Monitor Power System[J]. Computer Application, 2008, 28(6):

参考文献

- [1] 倪以信. 动态电力系统理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [2] 方思立, 朱方. 电力系统稳定器的原理及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.

收稿日期: 2009-12-01; 修回日期: 2010-01-18

作者简介:

张仰飞(1970-), 男, 副教授, 博士研究生, 研究方向为电力系统建模与控制; E-mail: zhangyf@njit.edu.cn

袁越(1966-), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统优化与控制。

陈小虎(1962-), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制。

366-368.

- [18] 周立功, 等. ARM 嵌入式系统基础教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [19] 周旭. 电子设备防干扰原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [20] 何宏, 张宝峰, 张大建, 等. 电磁兼容与电磁干扰[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

收稿日期: 2009-03-05; 修回日期: 2009-05-13

作者简介:

邓可(1974-), 男, 研究生, 实验师, 从事计算机领域教学和研究. E-mail: dk2156@163.com