

# 斩波串级调速系统逆变侧电子保护电路的研究与设计

张照彦<sup>1,2</sup>, 马永光<sup>1</sup>, 王兴武<sup>1,2</sup>, 王兵树<sup>1,2</sup>

(1. 华北电力大学自动化系, 河北 保定 071003; 2. 保定华仿科技股份有限公司, 河北 保定 071051)

**摘要:** 根据常规斩波串级调速系统的拓扑结构, 分析了调速设备故障时接触器保护在动作保护过程中主回路的暂态过程。由于接触器动作时间较长, 在其动作期间调速设备易受到高电压、大电流的冲击, 导致电力电子器件损坏。针对接触器保护的弊端, 设计了带电子保护电路的主回路拓扑结构。并分析了高压失电工况下常规的和带电子保护电路的斩波串级调速系统的暂态过程, 同时进行详细的理论推导, 得出高压失电工况下理论分析的依据。最后在模拟带载试验平台上分别对常规斩波串级调速系统和增加电子保护电路的调速系统在高压失电的工况下进行测试。测试结果表明理论计算与实际测量值基本一致, 同时验证了电子保护电路有效解决了有源逆变结构下的高压失电或者逆变颠覆的问题。

**关键词:** 电子保护电路; 高压失电; 有源逆变; 逆变颠覆

## Research and design on inverter side electronic-protection circuit of chopper cascade speed system

ZHANG Zhaoyan<sup>1,2</sup>, MA Yongguang<sup>1</sup>, WANG Xingwu<sup>1,2</sup>, WANG Bingshu<sup>1,2</sup>

(1. Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Baoding Sinosimu Technology Co., Ltd., Baoding 071051, China)

**Abstract:** According to the topology of conventional chopper cascade speed system, this paper analyzes the transient process of main loop of contactor protection when device failure. Because the contactor action requires a longer time, equipment is vulnerable to the impact of high voltage, high current during the contactor action, and cause damage to power electronic devices. For contactors and fast-cut protection drawbacks, the main circuit topology with electronic protection circuit is designed. Then transient process of conventional chopper cascade speed system and chopper cascade speed system with electronic protection circuit under high voltage power failure conditions are analyzed, and theoretics is detailedly deduced. The basis of theoretical analysis under high-voltage power failure condition is got. Finally, the conventional chopper cascade speed control system and with electronic protection circuits for high-voltage power failure conditions are tested on the simulated load test platforms. Experimental results show that the theoretical calculation is consistent with the actual measured values, and verify that electronic protection circuits effectively solve the problem of high-voltage power failure and inverter subversion under active inverter structure.

**Key words:** electronic-protection circuit; high-voltage power failure; active inverter; inverter subversion

中图分类号: TM315 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)15-0001-06

## 0 引言

当前定子侧变频调速与转子侧串级调速是工业现场应用较成熟的两种高压大功率电机调速技术。这两种调速技术都综合应用了电力电子技术、控制理论、信号测量、电机等多学科知识。变频调速从电机定子侧接入, 电机输出的功率需要全部流过变频器, 称为全功率控制, 其调速性能好, 但对现场环境的要求较为苛刻, 需放置在有空调的无尘房间;

此外变频器自身的损耗约占电机额定功率的4%~6%, 设备体积庞大, 价格昂贵。串级调速设备从电机转子侧接入, 其控制的功率为电机转差功率, 最大仅为电机额定功率的15%, 此外转子电压与转差率成正比, 按调速下限50%额定转速计算, 则电机在最低转速时, 转子电压仅为转子开路电压的50%, 并且随着转速的升高, 转子电压降低, 通常转子电压低于1 kV, 相比于变频器的6 kV或10 kV等级, 则属于低压范畴, 同时设备费用低廉, 本身

损耗小于电机额定功率的 1%，对运行环境要求较低，只需放置在普通厂房即可。随着电力电子技术、控制技术等新型技术的发展，斩波串级调速系统应运而生，其是串级调速系统的拓展，将逆变角固定在最小，通过改变占空比进而串入不同的等效反电势来调速，其相比于传统串级调速系统具有功率因数高、谐波小等优点，目前广泛应用于工业现场。斩波串级调速系统逆变属于有源逆变，而变频器则属于无源逆变，由于国内工业现场用电环境不同，有些现场经常会出现高压失电的现象，其会导致斩波串级调速系统逆变颠覆，严重时损坏设备内的器件。所以研究及设计斩波串级调速系统的新型保护电路，提高系统整体可靠性(尤其是不可预测的外部恶劣用电环境下)对于现场运行的系统有着非常重要的意义<sup>[1-4]</sup>。

本文首先介绍了常规的斩波串级调速系统主回路的拓扑结构，阐述了目前设备调速运行时发生故障后常用保护措施：接触器保护；并分析了动作保护时的主回路暂态过程。由于接触器分合过程的时间较长，通常为 40~200 ms，此阶段内故障电流会大幅快速升高，设备内的电力电子器件易受到大电流的冲击，超过器件的耐受值时会导致器件损坏；现场运行情况表明接触器不能瞬间切除故障电流，有效保护调速设备。针对接触器保护的弊端，在斩波串级调速系统结构的基础上设计了电子保护电路。接着分析了高压失电工况下常用保护的斩波调速系统和带电子保护电路的斩波串级调速系统的暂态过程，同时进行详细的理论推导，得出高压失电工况下理论分析的依据。最后在搭建的测试平台上对接触器保护和电子保护两种措施进行测试，测试结果表明电子保护电路是一种快速、高效的保护措施，有效解决了有源逆变结构下的高压失电或者逆变颠覆(触发脉冲丢失、晶闸管阻断能力变弱)的问题<sup>[5-8]</sup>。

## 1 电子保护电路原理及结构

### 1.1 接触器保护

接触器在斩波串级调速系统发生故障时依靠其自身的分合动作来切除故障电流，其有如下优点：(1)接触器控制简单，不像电力电子器件需要额外的驱动电路；(2)接触器承受高电压、大电流冲击的能力强；(3)接触器价格低廉。

图 1 为常规的斩波串级调速系统的结构示意图。从图中可以看出系统结构中有多个接触器。

常规的斩波串级调速系统在调速运行故障时通过接触器分合动作进行保护，接触器动作时间一般

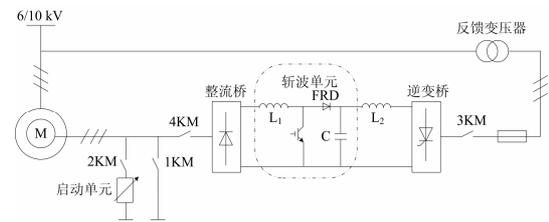


图 1 常规的斩波串级调速系统结构图

Fig. 1 Structure of conventional chopper cascade speed system

为大几十毫秒甚至一二百毫秒，在其动作期间内，故障电流或电压幅值持续快速增加，在接触器主触点断开或闭合之前有可能已将电力电子器件损坏。由于接触器的分合闸时间较长，对故障电流或电压难以瞬间切除，而不能有效地保护调速设备内的器件。

### 1.2 电子保护电路

针对接触器保护的弊端，设计了电子保护的主回路拓扑结构如图 2 所示。

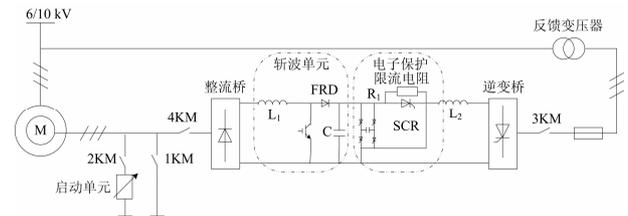


图 2 带电子保护电路的斩波串级调速系统结构图

Fig. 2 Structure of chopper cascade speed system with electronic protection circuit

从图 2 中可以看出，与图 1 结构相比较在主回路中增加电子保护电路，即在逆阻二极管 FRD 与电感  $L_2$  之间增加保护晶闸管 SCR、与保护晶闸管并联的限流电阻  $R_1$  以及保护晶闸管关断时的反偏电路。斩波串级调速系统正常调速时，保护晶闸管导通，将限流电阻  $R_1$  短接；当斩波串级调速系统调速故障时，保护电路发出关断保护晶闸管的信号，同时发出接触器动作信号，在接触器动作之前，保护晶闸管关断，将其跨接的限流电阻  $R_1$  串入主回路中以限制回路电流即逆变直流电流的上升<sup>[9-10]</sup>。

## 2 高压失电后电子保护电路投入前后分析

本节分析了调速系统高压失电时接触器保护、电子保护电路投切时的主回路暂态过程；并进行理论推导。

### 2.1 高压失电后调速系统接触器保护分析

调速正常运行过程中高压突然失电，此时相当于等效反电势突然失去，而等效回路中的线路电阻

很小, 可将逆变侧简化为 RLC 电路; 高压失电后的 10 ms 内故障电流即逆变直流电流上升很快而且幅值也会很高。图 3 为斩波调速系统正常运行时和高压失电时逆变侧等效电路。

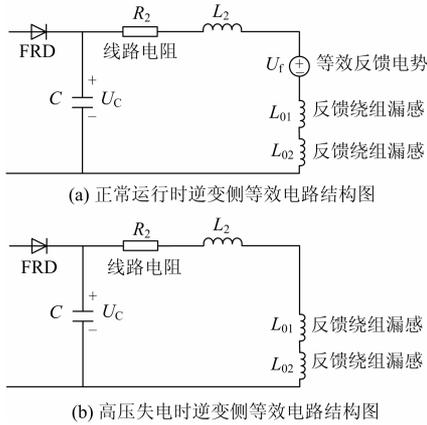


图 3 斩波串级调速高压失电前后逆变侧等效电路结构图  
Fig. 3 Inverter side equivalent circuit diagram of chopper cascade speed system before and after high voltage power failure

其中:  $C$  为电容;  $R_2$  为线路电阻;  $L_2$  为平波电抗器;  $L_{01}$  和  $L_{02}$  为反馈变压器的单相漏感。电路总电感为:  $L = L_2 + L_{01} + L_{02}$ 。

根据图 4(b)的电路建立高压失电时 KVL 方程为

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + R_2 C \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (1)$$

式中:  $C$  为电容值;  $u_c$  为电容电压;  $R_2$  为线路电阻;  $L$  为电路总电感。

对式(1)求解, 可得特征根为

$$p = -\frac{R_2}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R_2}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (2)$$

对于斩波串级调速装置, 主回路中线路电阻较小, 一般情况下

$$\left(\frac{R_2}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC} < 0 \quad (3)$$

通过式(3)可以推导出

$$R_2 < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4)$$

由式(3)可知式(1)有一对共轭根。若设:

$\delta = R_2/2L$ ,  $\omega^2 = 1/LC - (R_2/2L)^2$ ; 可得特征根为

$$\begin{cases} p_1 = -\delta + j\omega \\ p_2 = -\delta - j\omega \end{cases} \quad (5)$$

对于突然高压失电, 假设  $t=0$  时刻, 电路中的初始条件为式(5), 即高压失电瞬间电容电压值  $U_0$  和流过回路的电流值  $I_0$  为

$$\begin{cases} u_{c(0-)} = u_{c(0+)} = U_0 \\ i_{(0-)} = i_{(0+)} = I_0 \end{cases} \quad (6)$$

则电容电压  $u_c$  为

$$u_c = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (7)$$

式中, 系数  $A_1$  和  $A_2$  分别为  $A_1 = \frac{I_0 + U_0 p_2 C}{C(p_2 - p_1)}$ ,  $A_2 =$

$$-\frac{I_0 + U_0 p_1 C}{C(p_2 - p_1)}。$$

最后可推导出电容电压  $u_c$  为

$$\begin{aligned} u_c = & \frac{I_0 + U_0 p_2 C}{C(p_2 - p_1)} e^{p_1 t} - \frac{I_0 + U_0 p_1 C}{C(p_2 - p_1)} e^{p_2 t} = \\ & -\frac{I_0}{\omega C} e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t + \frac{U_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t + \beta) \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $\omega_0 = \sqrt{\delta^2 + \omega^2}$ ;  $\beta = \arctan(\omega/\delta)$ 。

对式(8)求导, 可推导出流过回路的电流即逆变直流电流为

$$\begin{aligned} i = & -C \frac{du_c}{dt} = -\frac{I_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \cdot \\ & \sin(\omega t - \beta) + \frac{U_0}{\omega L} e^{-\delta t} \sin \omega t \end{aligned} \quad (9)$$

对式(9)中的电流进行求导, 可推导出高压失电时刻至电流达到最大值的时间为

$$\begin{aligned} \frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow & \frac{d\left(-\frac{I_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) + \frac{U_0}{\omega L} e^{-\delta t} \sin \omega t\right)}{dt} = 0 \\ \Rightarrow t_{\text{Max}} = & \frac{\frac{U_0}{\omega L} - I_0 \omega \cos \beta - I_0 \omega \delta \sin \beta}{\frac{\arctan\left(\frac{L}{U_0 \delta} + I_0 \omega \sin \beta - I_0 \omega \delta \cos \beta\right)}{L} + I_0 \omega \sin \beta - I_0 \omega \delta \cos \beta} \cdot \omega \end{aligned} \quad (10)$$

将得出  $t_{\text{Max}}$  代入式(9), 可推导出电流最大值  $I_{\text{Max}}$  为

$$\begin{aligned} I_{\text{Max}} = & -\frac{I_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t_{\text{Max}}} \sin(\omega t_{\text{Max}} - \beta) + \\ & \frac{U_0}{\omega L} e^{-\delta t_{\text{Max}}} \sin \omega t_{\text{Max}} \end{aligned} \quad (11)$$

## 2.2 高压失电后调速系统电子保护电路分析

带电子保护电路的斩波串级调速系统逆变侧的等效电路如图4所示。

从图4(b)中可知, 当高压失电(调速系统故障)时回路总电阻为  $R$  为:  $R = R_1 + R_2$ 。逆变侧可等效

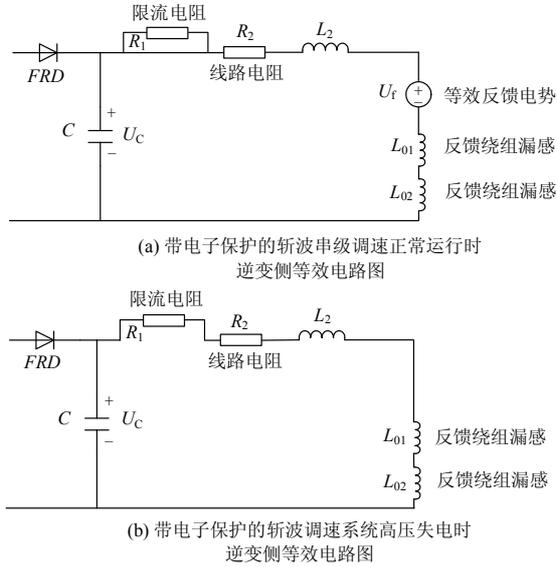


图 4 带电子保护的斩波串级调速高压失电前后  
逆变侧等效电路图

Fig. 4 Inverter side equivalent circuit diagram of chopper  
cascade speed system with electronic protection circuit  
before and after high voltage power failure

为 RLC 电路<sup>[11-12]</sup>。要求回路串入限流电阻后为非振荡放电或称为过阻尼放电过程，此时应满足下述情况

$$R > 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (12)$$

由上节推导可得电容电压  $u_c$  为

$$u_c = \frac{I_0 + U_0 p_2 C}{C(p_2 - p_1)} e^{p_1 t} - \frac{I_0 + U_0 p_1 C}{C(p_2 - p_1)} e^{p_2 t} + \frac{I_0}{C(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) + \frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_2 \cdot e^{p_1 t} - p_1 \cdot e^{p_2 t}) \quad (13)$$

式中： $U_0$  为高压失电瞬间电容电压值； $I_0$  为高压失电瞬间流过回路的电流值； $p_1$  和  $p_2$  为特征根，分别为

$$p_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}, \quad p_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

对式(13)求导，可推导出流过回路的电流为

$$i = -C \frac{du_c}{dt} = -\frac{I_0}{(p_2 - p_1)} (p_1 \cdot e^{p_1 t} - p_2 \cdot e^{p_2 t}) - \frac{U_0}{L(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \quad (14)$$

对式(14)中的电流进行求导，可推导出高压失电时刻至电流达到最大值的时间：

$$\frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow e^{(p_1 - p_2)t} = \frac{I_0 p_2^2 + \frac{U_0}{L} p_2}{I_0 p_1^2 + \frac{U_0}{L} p_1} \quad (15)$$

$$\ln\left(\frac{I_0 p_2^2 + \frac{U_0}{L} p_2}{I_0 p_1^2 + \frac{U_0}{L} p_1}\right)$$

$$\Rightarrow t_{\text{Max}} = \frac{\ln\left(\frac{I_0 p_2^2 + \frac{U_0}{L} p_2}{I_0 p_1^2 + \frac{U_0}{L} p_1}\right)}{p_1 - p_2}$$

同样，将得出  $t_{\text{Max}}$  代入式(14)，可推导出电流最大值  $I_{\text{Max}}$  为

$$I_{\text{Max}} = -\frac{I_0}{(p_2 - p_1)} (p_1 \cdot e^{p_1 t_{\text{Max}}} - p_2 \cdot e^{p_2 t_{\text{Max}}}) - \frac{U_0}{L(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t_{\text{Max}}} - e^{p_2 t_{\text{Max}}}) \quad (16)$$

### 3 分析验证

根据提出的斩波串级调速系统电子保护电路设计方案，在常规斩波串级调速系统(接触器保护)上分别增加电子保护电路，并在模拟带载测试平台上分别测试。

模拟带载测试平台的绕线式电机铭牌数据为：额定功率 90 kW；定子电压 380 V；定子额定电流 179 A；效率 93%；功率因数 0.82；额定转速 740 rpm；转子开路电压 281 V；转子额定电流 199 A。根据电机铭牌数据按照额定转速的 30% 为调速下限设计斩波串级调速系统；反馈变压器二次侧电压为 240 V，整流桥后电抗器  $L_1$  为 1 mH，逆变侧电抗器  $L_2$  为 6 mH，电容  $C$  为 8 000  $\mu\text{F}$ ，调速系统的参数如表 1 所示。

表 1 斩波串级调速系统参数表

Table 1 Chopper cascade speed system parameter table

转子整流电压/V	逆变直流电压/V	逆变交流电压/V
379.4	280.6	240
转子直流电流/A	逆变直流电流/A	逆变交流电流/A
242.8	50	41

根据调速系统的设计参数，用上节推导的公式计算。对于常规的斩波串级调速系统，当高压失电时电容电压初值为  $U_0=280$  V；逆变直流电流  $I_0=40$  A；电抗器  $L_2=6$  mH；反馈绕组漏感  $L_{01}=L_{02}=0.1$  mH；逆变侧等效总电感  $L=6.2$  mH；线路电阻  $R_2=0.003$   $\Omega$ ； $t_{\text{Max}}=0.01051$  s；逆变直流电流最大值为  $I_{\text{Max}}=310.869$  A，是逆变直流电流额定值的 6.2 倍左右，如图 5(a)所示。而对于带电子保护电路的斩波串级调速系统，工况与上述相同，限流电阻  $R_1=2$   $\Omega$ ，可以求出高压失电时刻至逆变直流电流到最大值的时间

间为  $t_{\text{Max}}=0.005\ 701\ \text{s}$ ; 逆变直流电流最大值为  $I_{\text{Max}}=108.182\ \text{A}$ , 是逆变直流电流额定值的 2.2 倍左右, 如图 5(b)所示。

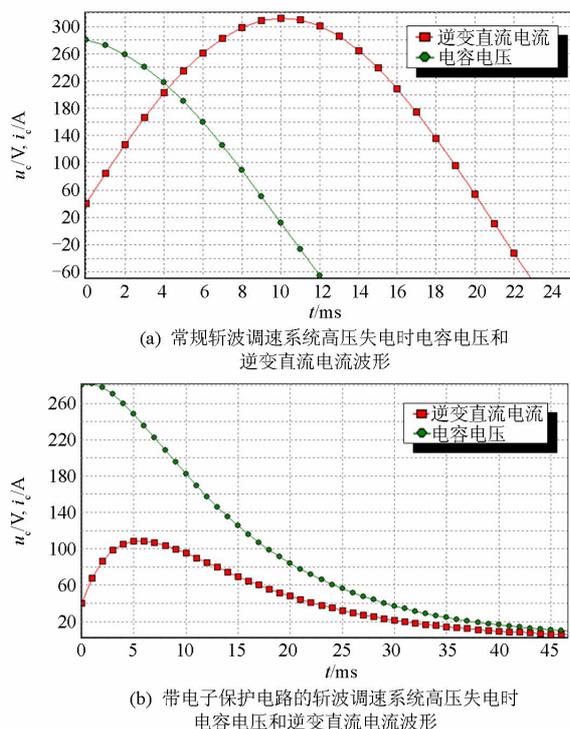


图 5 理论计算的常规与带电子保护电路的斩波调速高压失电时电容电压和逆变直流电流波形

Fig. 5 Capacitor voltage and inverter DC current waveform under theoretical analysis of chopper cascade speed system when high-voltage power failure

对模拟带载试验平台的常规斩波串联调速系统改造, 在调速系统主回路中增加电子保护电路, 限流电阻为  $2\ \Omega$ 。图 6 为斩波串联调速系统增加电子保护电路前后在高压失电时直流回路中电容电压、逆变直流电流波形图。

图 6(a)中可以看出, 高压失电后常规的斩波串联调速系统在接触器合闸动作之前, 逆变直流电流由  $40\ \text{A}$  左右大幅度快速上升; 上升至大约  $320\ \text{A}$  左右, 为额定值的 6.4 倍左右并持续较长时间, 会冲击逆变桥中的晶闸管, 严重时损坏晶闸管; 而对于带电子保护电路的斩波串联调速系统如图 6(b)所示, 当高压失电后接触器动作之前, 保护晶闸管 SCR 打开, 将限流电阻  $R_1$  串入回路中, 逆变直流电流幅值上升, 但是上升的幅度较小, 大约为  $110\ \text{A}$ , 上升至额定值的 2.2 倍左右并迅速衰减, 对逆变桥中的晶闸管冲击较小。

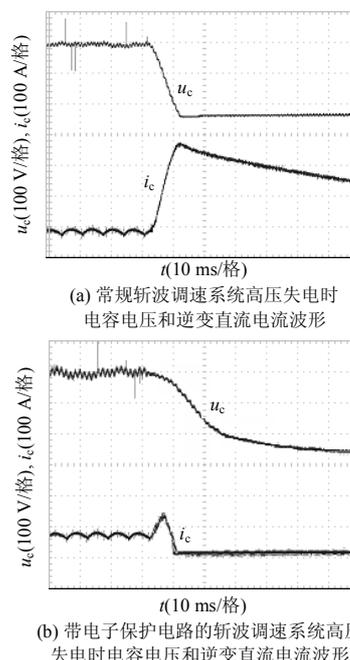


图 6 斩波调速系统高压失电时电容电压和逆变直流电流波形图

Fig. 6 Capacitor voltage and inverter DC current waveform of chopper cascade speed system's simulation model in Matlab when high-voltage power failure

如表 2 所示, 在模拟带载试验平台上的测试结果表明理论计算与实际测量值基本一致, 误差在 3% 以内; 验证了斩波串联调速系统高压失电暂态过程理论推导的正确性, 同时表明了电子保护电路的有效性。

表 2 斩波串联调速系统不同保护方式下理论计算与实际测量误差表

Table 2 Theoretical calculations and the actual measurement error table under different protection of chopper cascade speed system

	常规接触器保护	带电子保护电路
理论计算/A	310.869	108.182
实际测量/A	320	110
误差/%	2.930	1.680

## 4 结论

根据常规的斩波串联调速系统主回路拓扑结构, 分析了在调速故障时接触器保护的主回路暂态过程; 由于接触器动作时间较长, 一般为大几十毫秒甚至一二百毫秒, 在接触器动作期间, 调速设备很容易受到高电压、大电流的冲击, 进而损坏调速设备的电力电子器件, 表明接触器不能有效对调速设备内的器件进行保护。针对接触器保护的弊端,

设计了带电子保护电路的主回路拓扑结构; 分析了高压失电工况下常规斩波调速系统和带电子保护电路的斩波串级调速系统的暂态过程, 同时进行详细的理论推导, 得出高压失电工况下理论分析的依据。最后在模拟带载试验平台上分别对常规斩波串级调速系统和增加电子保护电路的调速系统(限流电阻为  $2\ \Omega$ ) 高压失电的工况下进行测试, 测试结果表明理论计算与实际测量值基本一致, 误差在 3% 以内; 同时验证电子保护电路有效解决了有源逆变结构下的高压失电或者逆变颠覆(触发脉冲丢失、晶闸管阻断能力变弱)的问题。

### 参考文献

- [1] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected system based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [2] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.  
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [3] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.  
YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [4] 张军伟, 王兵树, 姜萍. 斩波串级调速系统建模与双闭环控制仿真[J]. 控制工程, 2011, 18(6): 977-981.  
ZHANG Junwei, WANG Bingshu, JIANG Ping. System modeling and double closed-loop control simulation in chopped wave cascade speed control system[J]. Control Engineering of China, 2011, 18(6): 977-981.
- [5] 江友华, 宁宇, 吴国祥. 基于状态空间平均模型的全数字双闭环斩波内馈串级调速系统[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(1): 109-112.  
JIANG Youhua, NING Yu, WU Guoxiang. Study on digital dual closed-loop chopper inner-feed cascade variable speed drive system based on state-space averaging model and its application[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(1): 109-112.
- [6] 龚博, 程善美, 秦忆. 基于载波的三电平中点电压平衡控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 172-177.  
GONG Bo, CHENG Shanmei, QIN Yi. A three-level neutral point voltage balance control strategy based on carriers of SPWM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 172-177.
- [7] 周德贤, 王一华. 晶闸管内反馈串级调速与高频斩波串级调速对比[J]. 电机与控制应用, 2007, 34(2): 42-45.  
ZHOU Dexian, WANG Yihua. Comparison of cascade speed regulation between inner-feedback and high-frequency chopper in SCR[J]. Electric Machines & Control Application, 2007, 34(2): 42-45.
- [8] 谢军, 孙忠献, 温晓玲. 斩波串级调速系统主电路的分析[J]. 机电工程, 2007, 24(9): 81-82.  
XIE Jun, SUN Zhongxian, WEN Xiaoling. Analysis on main circuit in chop-wave cascade speed-regulation system[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2007, 24(9): 81-82.
- [9] 王清灵, 顾军. 矿井提升机斩波串级调速系统的研究[J]. 工矿自动化, 2008, 12(6): 19-22.  
WANG Qingling, GU Jun. Research of chopping cascade speed-regulation system of mine hoist[J]. Industry and Mine Automation, 2008, 12(6): 19-22.
- [10] 申张亮, 郑建勇, 梅军, 等. 基于改进电压空间矢量调制的有源滤波器双滞环电流跟踪控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 8-14.  
SHEN Zhangliang, ZHENG Jianyong, MEI Jun, et al. Double hysteresis current tracking control scheme for active power filter based on improved voltage space vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(15): 8-14.
- [11] 顾和荣, 杨子龙, 邬伟扬. 并网逆变器输出电流滞环跟踪控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 108-112.  
GU Herong, YANG Zilong, WU Weiyang. Research on hysteresis band current tracking control of grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 108-112.
- [12] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.  
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.

收稿日期: 2014-10-24; 修回日期: 2015-01-07

作者简介:

张照彦 (1979-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电机调速控制、电力电子技术、电力拖动; E-mail: icysnowspark@126.com

马永光 (1964-), 男, 硕士, 教授, 研究方向为计算机仿真及过程控制、电厂综合自动化;

王兴武 (1975-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电机调速控制、电力电子技术、电力拖动。

(编辑 葛艳娜)