

# 电压暂降下整流装置特性仿真研究

周晖<sup>1,2</sup> 易忠林<sup>3</sup> 袁瑞铭<sup>1</sup> 彭楚宁<sup>3</sup>

(1.华北电力科学研究院有限责任公司,北京 100045 2.中国科学院电工研究所,北京 100190;  
3.华北电网有限公司,北京 100053)

**摘要** 随着电力工业的发展及负荷结构的变化,电能质量问题日益突出,特别是电压暂降,给电网及敏感负荷的正常运行带来了诸多问题,也引起了广泛的关注。本文针对工业生产中广泛应用的整流装置,通过仿真分析研究了其在不同电压暂降类型(单相和三相)、负载条件(阻性和感性)和整流控制方式( $\alpha$ 角控制和PWM控制)下的动态特性,分析了其暂降敏感度及原因,并通过对比提出了应对电压暂降问题的策略。

**关键词** 电压暂降;整流器;电压敏感度;PWM控制

中图分类号:TM934

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2009)07-0022-06

## Study on the Characteristic of AC/DC Converter under Voltage Sags

ZHOU Hui<sup>1,2</sup>, YI Zhong-lin<sup>3</sup>, YUAN Rui-ming<sup>1</sup>, PENG Chu-ning<sup>3</sup>

(1.North China Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China. 2.Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China. 3. North China Grid Company Limited, Beijing 100053, China)

**Abstract:** With the development of electrical industry and the change of load structure, power quality problems are more and more serious, especially the voltage sags. They have brought many problems to the power grid and sensitive loads, and therefore caused much attention worldwide. In this paper, the widely used AC/DC converters in industrial production are discussed. Their characteristic under different voltage sag types (single phase and three phase), load condition (ohmic and capacitive) and converter control method, are analyzed based on the simulation results, as well as their voltage sensitivities and the causes. Some strategies for voltage sags are introduced based on the comparison of simulation results.

**Key words** voltage sags, AC/DC converter, voltage sensitivity, PWM control

### 0 引言

当前,随着电力负荷的迅速增长,大量冲击性、非线性、非对称负荷获得了广泛应用,如大型轧钢机、晶闸管整流电源、变频调速装置等。它们的起动、停止、运行都可能导致电力系统电压波动及电压波形畸变等问题。加之电网控制手段不完善、运行操作、故障和各种外来干扰等原因,由此而产生了电网运行、电器设备和用电中的各种各样的电能质量问题。

国际电工委员会IEC中将上述电能质量问题统称为“电磁兼容”(EMC),其定义为设备或系统在其电磁环境中符合要求运行并不对其环境中的任何设备产生无法忍受的电磁干扰的能力。表1所示为电力系统常见的电磁现象的分类和特征<sup>[1]</sup>。

另一方面,随着工业自动化、国民经济信息化的

发展,基于计算机、微处理器的各种类型用电设备及各种电力电子设备在电力系统中大量使用,它们对供电质量的要求比一般机电设备更为苛刻。其中尤以电压暂降对设备正常、安全运行的影响最为严重,它能够对计算机、复杂电子设备、精密仪器、可编程控制器、变频调速电机等许多用电设备造成不利影响。

### 1 负荷敏感度

电压暂降通常是由系统中某处电流突然大幅增加,然后在极短时间内恢复正常所引起的。短路故障、感应电机启动和变压器投运是最主要的原因<sup>[2,3]</sup>。从总体上看电压暂降带来的损失是巨大的,所以了解用电设备对电压暂降的敏感程度如何,对用户来说非常重要,也是评估电压暂降对设备影响程度的一个直观性和可量化的指标。为此定义了负荷敏感度,它是指负

表1 电力系统电磁现象的种类和特征  
Tab.1 Classification and Characteristic of electromagnetic phenomena in power grid

种类	典型频谱成分	典型持续时间	典型电压幅值/pu	
电磁瞬态冲击	ns级	5ns上升	<50ns	
	μs级	1μs上升	50ns~1ms	
	ms级	0.1ms上升	>1ms	
电磁瞬态振荡	低频	<5kHz	0.3~50ms	
	中频	5~500kHz	20μs	
	高频	0.5~5MHz	3μs	
即时电压波动	中断	0.5~30周波	<0.1	
	暂降	0.5~30周波	0.1~0.9	
	升高	0.5~30周波	1.1~1.8	
瞬时电压波动	中断	30周波~3s	<0.1	
	暂降	30周波~3s	0.1~0.9	
	升高	30周波~3s	1.1~1.4	
暂时电压波动	中断	3s~1min	<0.1	
	暂降	3s~1min	0.1~0.9	
	升高	3s~1min	1.1~1.2	
长期电压波动	持续中断	>1min	0.0	
	欠电压	>1min	0.8~0.9	
	过电压	>1min	1.1~1.2	
电压不平衡		稳态	0.5%~2%	
波形失真	直流偏移		稳态	0~0.1%
	谐波	0~100th	稳态	0~20%
	间谐波	0~6k Hz	稳态	0~2%
	缺口		稳态	0~1%
	噪声	宽带	稳态	0~1%
电压波动	<25Hz	断续	0.1~7%	
频率偏差		<10s		

荷对电能质量问题的敏感程度。其中,主要考察的电能质量问题就是电压暂降,因此负荷敏感度也成为了衡量负荷电压暂降敏感程度的主要指标。

目前国际上通常采用设备灵敏度曲线来描述不同敏感设备的电压敏感度。它一般用上下两条分支来定义设备能够承受的高、低电压极限。目前应用最广泛的是 CBEMA (Computer Business Equipment Manufacturers Association) 曲线和 ITIC (Information Technology Industry Council) 曲线。文献[4]给出了一些典型敏感设备对电压暂降的敏感度曲线,如图1所示。

由图1所示,不同类型设备的电压敏感度有着较大差异,无论是能保证正常工作的电压暂降幅值范围,还是暂降持续时间。另一方面,灵敏度曲线只能粗略反映暂降和持续时间对不同类型设备的影响。对于同类型的各种设备,由于其具体的实现原理、拓扑结构、负载条件、控制方式等的不同,都会对实际的敏感度造成很大的影响。此外电压暂降的幅度、不平衡程度、持续时间对敏感负荷的影响程度也有很大差

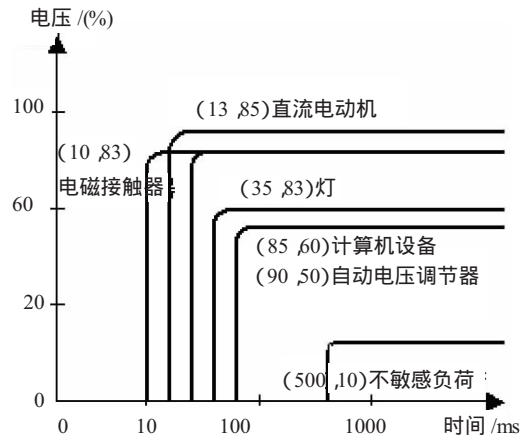


图1 典型敏感设备的CBEMA曲线

Fig.1 The CBEMA curves of typical sensitive equipment

别。因此仅仅依赖设备敏感度曲线来描述负载的电压暂降敏感度是不够的,有必要对不同暂降条件下,不同典型负荷的运行特性进行仿真分析,从而为电压暂降补偿的研究提供依据。

## 2 整流装置电压敏感度仿真分析

整流装置(AC/DC变换器)是目前工业上应用非常广泛的电力电子装置,计算机等电子设备的电源、可调速驱动(ASD)、直流电机等设备的输入都需要通过整流器将工频工业供电转换为直流供电。因此研究整流器在电压暂降条件下的敏感度有着特别重要的意义。整流器的类型很多,按照整流电路中所使用的开关器件及控制方式的不同,可分为:不控整流、半控整流和全控整流。目前在敏感设备中使用最多的是全控整流电路,因此本文将主要研究三相桥式全控整流电路。

典型的整流电路为由6个晶闸管构成的三相桥式全控整流电路,其中上三管共阴极,下三管共阳极,输入电压为三相交流电压源的线电压。

整流器通常接阻性或感性负载,最常见的整流桥控制方式分别为α角控制和PWM控制方式,因此在仿真中只考虑上述负载和控制方式下整流桥的暂降特性。由于整流桥取用的是线电压,因此仅考虑由两相短路和三相短路故障引起的单相和三相线电压暂降。

若三相输入相电压有效值为 $V_s$ ,频率为 $f_s$ ,周期为 $T_s$ ,角频率 $\omega=2\pi f_s=2\pi/T_s$ ,则三相交流电压为:

$$v_a = \sqrt{2} V_s \sin \omega t \quad (1)$$

$$v_b = \sqrt{2} V_s \sin (\omega t - 120^\circ) \quad (2)$$

$$v_c = \sqrt{2} V_s \sin (\omega t + 120^\circ) \quad (3)$$

线电压输入为:

$$v_{ab} = v_a - v_b = \sqrt{6} V_s \sin(\omega t + 30^\circ) \quad (4)$$

$$v_{ac} = v_a - v_c = \sqrt{6} V_s \sin(\omega t - 30^\circ) \quad (5)$$

$$v_{bc} = v_b - v_c = \sqrt{6} V_s \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (6)$$

$$v_{ba} = v_b - v_a = \sqrt{6} V_s \sin(\omega t - 150^\circ) \quad (7)$$

$$v_{ca} = v_c - v_a = \sqrt{6} V_s \sin(\omega t - 210^\circ) \quad (8)$$

$$v_{cb} = v_c - v_b = \sqrt{6} V_s \sin(\omega t - 270^\circ) \quad (9)$$

采用阻性负载时, 直流侧电压平均值  $V_D$  为:

$$V_D = \begin{cases} \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_s [1 + \cos(60^\circ + \alpha)] & \alpha \geq 60^\circ \\ \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_s \cos\alpha, & \alpha < 60^\circ \end{cases} \quad (10)$$

可见, 当相控角  $\alpha$  固定时,  $V_D$  完全取决于交流输入电压的幅值。

当直流侧接感性负载时, 直流侧输出电压的平均值  $V_D$  为:

$$V_D = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_s \cos\alpha \quad (11)$$

当  $\alpha$  固定时,  $V_D$  同样只正比于交流输入电压幅值。

### 2.1 整流器定 $\alpha$ 角控制电压暂降仿真

采用 MATLAB 来仿真阻性和感性负载条件下的直流侧电压波形。分别采用 1 欧姆的电阻, 和由 1 欧姆电阻和 0.02H 电感的串联支路来模拟阻性和感性负载。定  $\alpha$  角控制的拓扑结构如图 2 所示。三相对称交流电源通过三相线路给整流桥供电, 整流桥由 6 个晶闸管构成, 采用定  $\alpha$  角控制, 通过采样  $v_{ab}$ 、 $v_{bc}$  和  $v_{ca}$  三个线电压的过零点来控制触发脉冲。电压源为相电压幅值  $208\sqrt{\frac{2}{3}}$  V, 60Hz, 互差  $120^\circ$  的对称交流电源, 通过控制开关的动作来实现电压暂降的模拟。通过调节开关的内阻来控制电压暂降的幅值。三相短路的模拟则通过再增加一个动作时间同步的电气开关来实现。

#### (1) 正常运行状况

首先考虑电源侧正常运行的状况。由于感性负载的续流, 使直流侧电压出现了负值, 其平均电压也低于阻性负载下的值。

实际应用中, 为了降低直流侧的纹波, 维持直流电压稳定, 通常会在直流母线上并联一个大电容。加入了电容后, 直流侧电压将非常平稳, 负载对直流母线的影响基本可以忽略, 因此在接下来的仿真中均采用直流母线带平波电容的模型, 以便更好地了解电源侧扰动对直流输出电压的影响程度。

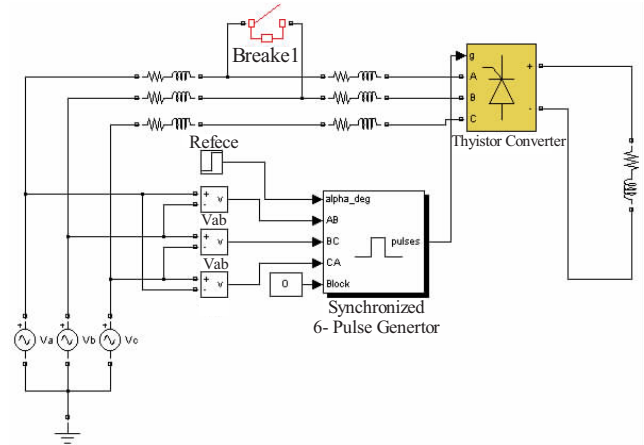


图 2 三相全控整流桥定  $\alpha$  角控制仿真结构图

Fig.2 The simulation topology of three phase rectifier with  $\alpha$  control

#### (2) 单相电压暂降

当电源侧发生两相短路时, 三相线电压就产生了单相电压暂降, 暂降程度由短路阻抗决定。仿真条件为两相短路引起的电源侧 80% 单相线电压暂降, 图 3 为感性负载下, 直流侧的电压波形。由图可见, 直流侧电压在暂降发生时, 由正常的 210V 跌落到接近 190V, 电压暂降值也接近于 20%, 说明在暂降条件下, 同样可以采用正常电压下的直流母线电压计算公式来近似分析直流侧电压。

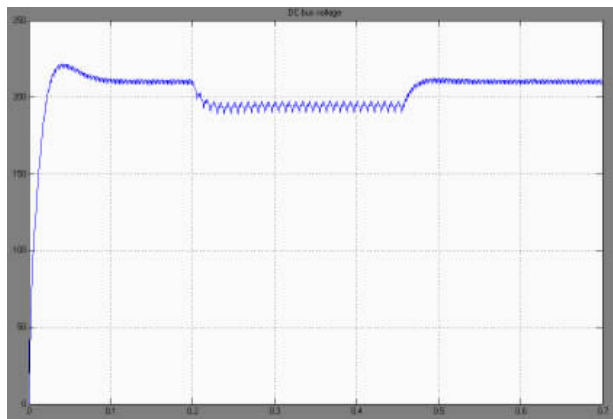


图 3 感性负载下直流侧电压

Fig.3 DC voltage under inductance load

暂降发生时, 直流侧电压并没有立即降至 80%, 而是经过了一个过渡过程, 这是由于直流侧电容储能所起的缓冲作用所致。在此期间电容和电源侧共同对负载供电, 直至电容电压达到稳定值。此过程的长短由电容值和负载大小来确定, 也即 RC 或 RLC 并联电路的时间常数来确定。对 RC 电路而言  $\tau = RC$ ; 对于 RLC 并联电路而言  $\tau = RC/L$ 。

暂降期间, 直流母线纹波明显增大, 这是由于采用了定  $\alpha$  角控制造成的。如图 4 所示,  $U_a$  为暂降后 a 相



的电压  $U_a$  为正常的 a 相电压, 当  $\alpha=0^\circ$  (图中 A 点) 触发时, 虽然能完成自然换相, 但  $U_{ab}$  远低于直流侧电压, 此时交流侧电压无法通过整流桥传输到直流侧, 而由于直流电容电压不能突变, 因此该过程完全由直流电容给负载供电, 从而导致直流电压大幅下降, 在波形图上出现明显的电压凹陷, 从而使直流电压大幅脉动。

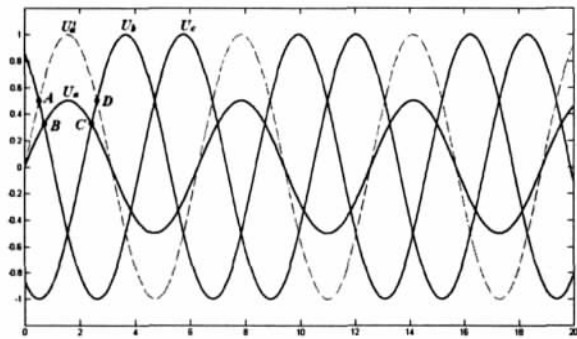


图 4 单相电压暂降波形

Fig.4 The waveform of single phase voltage sag

(3) 三相电压暂降

当电源侧发生三相短路时, 三相线电压就产生了三相电压暂降, 暂降程度同样由短路阻抗决定。仿真条件为电源侧三相线电压 80% 暂降, 图 5 为感性负载下直流侧电压。由图可见, 直流侧电压在暂降发生时, 由正常的 210V 跌落至接近 200V, 电压暂降值接近于 10%, 反而没有单相短路时直流侧电压下降明显, 其原因可以通过图 6 来说明。

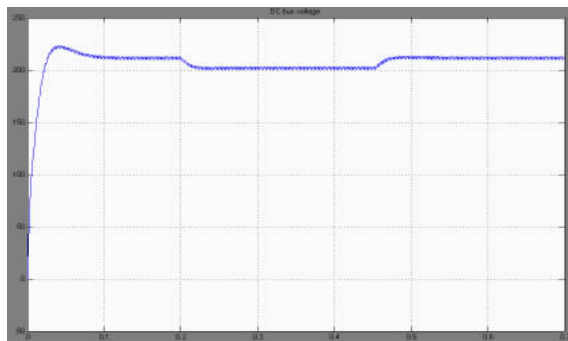


图 5 感性负载下直流侧电压

Fig.5 DC voltage under inductance load

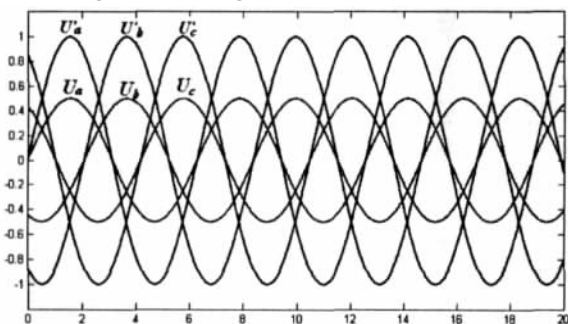


图 6 三相电压暂降波形

Fig.6 The waveform of three phase voltage sag

如图 6 所示, 当发生三相对称电压暂降时,  $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$  交点的位置与未发生暂降时相同, 因此采用定  $\alpha$  角控制的话, 触发脉冲发出的时候正好是自然换相点, 所以不存在单相电压暂降中电容器单独供电的过程, 也就是说电源侧功率的流动是连续的。在暂降期间, 直流侧电压并没有出现类似单相暂降时的脉动, 这也同样可以由上述的分析来解释。

由上述分析可以得出单相电压暂降相对于三相电压暂降, 对整流设备运行的影响更为严重, 然而事实并非如此。由公式 (10) 和 (11) 可知, 直流侧电压与  $\alpha$  角的余弦值是成正比的,  $\alpha$  角越小, 对直流侧电压的影响越大; 当  $\alpha$  角固定之后, 在单相电压暂降期间, 随着电压暂降程度的加深, 输入功率中断的时间将增加, 电容上将会有更长的放电时间, 从而导致直流母线电压大幅下降; 而未发生暂降的两相导通期间, 则与正常时的情况差别不大; 而对于三相电压对称暂降, 不存在输入功率中断的过程, 但在三相导通期间由于幅值的下降必然导致直流电压的下降。

对于单相电压暂降, 随着  $\alpha$  角的增大, 输入功率中断的过程将逐渐缩短, 从而使直流侧电压下降的程度减小。也就是说当暂降程度较深时,  $\alpha$  角的影响将减弱; 但对于三相电压暂降, 无论  $\alpha$  角如何变化, 一旦  $\alpha$  角确定下来, 直流侧电压值就决定于输入电压的幅值。因此对于一个固定的  $\alpha$  角, 存在一个特定的暂降幅值, 使得直流侧电压在单相和三相暂降时电压下降的程度相同。当暂降程度进一步加深时, 三相暂降对直流电压的影响更为明显。总的来看, 由于对整个换相过程都有较大影响, 三相电压暂降的影响将比单相暂降更为严重。

2.2 整流器 PWM 控制电压暂降仿真

电压型 PWM 整流器的电路如图 7 所示, 定义 A 相的开关信号为  $S_a$ , 则  $S_a=1$  时,  $S_1$  开通,  $S_4$  关断;  $S_a=0$  时,  $S_1$  关断,  $S_4$  导通。类似地定义 B 相和 C 相开关信号为  $S_b$  和  $S_c$ 。  $U_d$  为直流电压,  $L$  为滤波电感 (忽略电阻),  $C$  为直流侧的电容,  $R_L$  为负载,  $i_L$  为负载电流。

假设系统输入的三相电压对称, 则有:

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{ca} = 0 \quad (12)$$

在无中性线系统中, 有:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (13)$$

根据基尔霍夫电流、电压定律可以得到三相 PWM 整流器开关数学模型:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = -R_a i_a + [u_a - (S_a - \frac{S_a+S_b+S_c}{3})U_d] \\ L \frac{di_b}{dt} = -R_b i_b + [u_b - (S_b - \frac{S_a+S_b+S_c}{3})U_d] \\ L \frac{di_c}{dt} = -R_c i_c + [u_c - (S_c - \frac{S_a+S_b+S_c}{3})U_d] \\ C \frac{dU_d}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - \frac{U_d}{R_L} \end{cases} \quad (14)$$

对式(14)作dq变换,可得到dq坐标系下的整流单元数学模型:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L} i_d + \omega i_q - \frac{S_d}{L} U_{dc} + \frac{1}{L} U_{ad} \\ \frac{di_q}{dt} = -\omega i_d - \frac{R}{L} i_q - \frac{S_q}{L} U_{dc} + \frac{1}{L} U_{aq} \\ \frac{dU_d}{dt} = \frac{3S_d}{2C} i_d + \frac{3S_q}{2C} i_q - \frac{U_d}{CR_L} \end{cases} \quad (15)$$

由上式可知,d轴和q轴的电流是相互耦合的,因此需要在dq坐标系下的电流控制系统中对电流进行

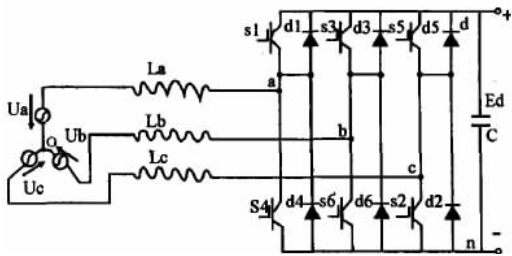


图7 三相PWM整流器主电路图

Fig.7 The topology of three phase PWM rectifier 解耦,从而得到较好的动、静态特性。

仿真模型如图8所示,采用600V/30MVA/60Hz的三相对称交流电压源,通过三相Y/Y联接的变压器(600V/240V)向整流桥供电。电源侧接有500kvar和1MW的模拟负载;整流单元由三相三电平IGBT整流桥构成,最大直流电压500V,容量为500kW PWM调

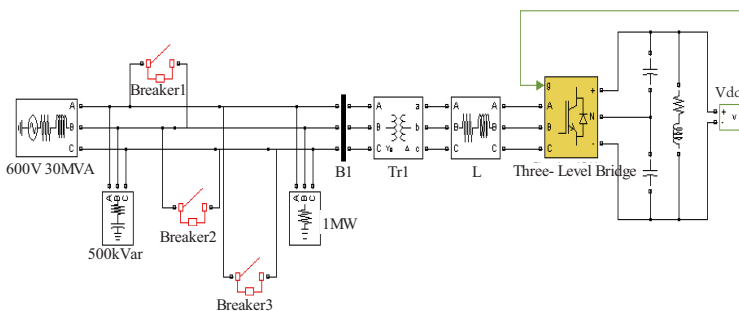


图8 三相全控PWM整流桥仿真模型

Fig.8 The simulation topology of three phase PWM rectifier

制器频率为1620Hz,采用双闭环控制方式来调节直流母线电压(DC母线电压控制和负载功率控制);直流母线通过2个75000μF的电解电容来实现稳压和平波,短路故障由图中的开关来控制。

(1) 正常运行状况

仿真结果显示,当电源侧正常运行时,阻性和感性负载对直流母线电压的影响并不明显,只是在起始过程中,感性负载的过渡时间更长。

(2) 单相电压暂降

当电源侧发生单相电压暂降时,暂降后电压为正常值的80%。图9为感性负载下直流母线的电压波形。在暂降过程中,直流侧的纹波明显增大,但电压平均值只有轻微的下降,大约由稳态的226V下降到222V。这说明单相电压暂降程度不深时,由于另外两相的正常供电以及直流母线的支撑能力,对于PWM控制而言,应对此种电压暂降事件时有很好的鲁棒性。暂降期间电压纹波的增大,是由于整流器控制中调节直流母线Vd的PI调节器的参数值的选择,以及PI调节器自身调节性能的局限性,如果改为PID控制的话,电压纹波将有望进一步得到遏制。

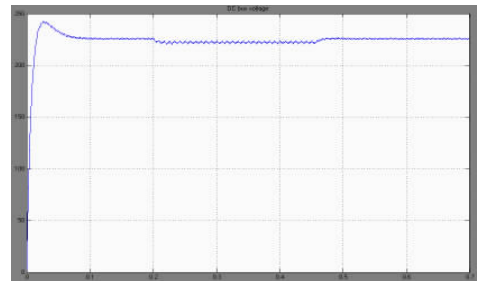


图9 80%暂降时感性负载下直流侧电压

Fig.9 DC voltage under inductance load and 80% single phase voltage sag

(3) 三相电压暂降

当电源侧发生三相短路故障时,三相线电压出现80%三相电压暂降,图10为感性负载下,直流侧的电压波形。

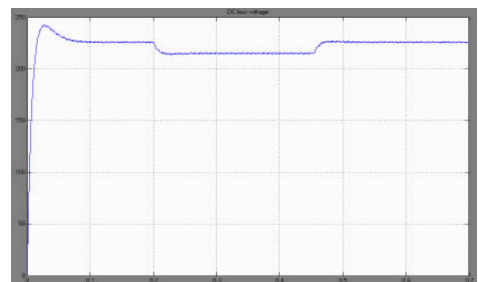


图10 80%三相电压暂降感性负载下直流侧电压

Fig.10 DC voltage under inductance load and 80% three phase voltage sag

从图中可以看到,与定 $\alpha$ 角控制的整流器不同,三相电压暂降对直流母线电压的影响较之单相电压暂降要明显得多,这也符合我们通常的认识。暂降前的直流母线电压平均值约为226V,暂降过程中约为215V,暂降幅度约为4.87%,可见PWM控制方式下的整流器对敏感负荷能起到较好的保护。

### 3 结束语

本文对目前工业生产中应用最广泛的定 $\alpha$ 角控制和PWM控制方式的三相全桥整流装置,在不同幅值的单相和三相电源电压暂降条件下的特性进行了仿真研究。仿真结果显示:(1)就总体而言PWM控制方式下的整流装置对电压暂降的敏感度更低;(2)三相电压暂降在大多数情况下对整流设备的影响较之单相电压暂降更为严重;(3)直流母线平波电容的大小对电压敏感度起着至关重要的作用。

然而选择过大的电容值将大大提高设备的成本。因此在工业生产中,应根据供电状况和整流装置所供负载的要求,选择合适的整流器控制方式和平波电容值,从而实现性能和价格的最佳平衡。

### 参考文献

[1] H. J. Bollen. Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions[M]. New York :IEEE PRESS, 2000.  
[2]吴刚,滕云,潘永刚. 电力系统电压跌落相关问题初探.[J] 华北电力技术, 2004, (4) :1~4.  
Wu Gang, Teng Yun, Pan Yonggang. Research on Voltage Sag of Power Systems[J]. NORTH CHINA ELECTRIC POWER, 2004, (4) :1~4.  
[3]吴玉蓉,刘会金,孙丽萍等. 电能质量问题中的电压跌落[J]. 电力建设, 2002, 23(8) :64~67.  
Wu Yurong, Liu Huijing, Sun Liping, et, al. Voltage Sags in the Problems of Power Energy Quality[J]. Electric Power Construction, 2002, 23(8) :64~67.  
[4]尹元. 计及电压暂降的配电网可靠性的模拟算法及实现[D]. 北京: 华

北电力大学硕士学位论文, 2005. 9.  
[5] M. Samotyj, C. Gellings, M. Amin. Power System Infrastructure for a Digital Society: Creating the New Frontiers. CIGRE/IEEE- PES International symposium. Canada, October 2003.  
[6] H. J. Bollen. The Influence of Motor Reacceleration on Voltage Sags[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1995, 31(4).  
[7] D. O. Koval. Power Quality Characteristics of Rural Electric Secondary Power Systems[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1999, 35(2).  
[8] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004 : 124~138.  
[9]肖遥. 供电系统的电压下凹[J]. 电网技术, 2001, 25(1) :24~31.  
Xiao Yao. Voltage Dip In Power Supply Network [J]. Power System Technology, 2001, 25(1) :24~31.  
[10]王宾,潘贞存,徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2) :56~59.  
Wang Bin, Pan Zhencun, Xu Bingyin. Analysis of voltage sags in distribution system[J]. Power System Technology, 2004, 28(2) :56~59.  
[11]张鹏,郭永基. 电压骤降的可靠性评估新方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(8) :20~24.  
Zhang Peng, Guo Yongji. Probabilistic assessment of voltage sags in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(8) :20~24.  
[12]宋云亭,郭永基,张瑞华. 基于电磁暂态仿真的电压骤降概率评估[J]. 清华大学学报, 2003, 43(9) :1177~1180.  
Song Yunting, Guo Yongji, Zhang Ruihua. Probability assessment of voltage sags based on electromagnetic transient simulations [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2003, 43(9) :1177~1180.  
[13]李国栋,金焱,顾强,徐永海. 电能质量扰动对异步电动机特性影响的分析与仿真研究[J]. 继电器, 2007, 35(2):49~54.  
Li Guodong, Jin Yan, Gu Qiang, Xu Yonghai. Analysis and simulation of power quality disturbance impacts on performance of asynchronous motor[J]. RELAY, 2007, 35(2):49~54.  
作者简介:  
周晖(1979-) 男,湖北宜昌人,博士,工程师,主要从事电能质量、电力二次设备质量检测等相关领域研究。Email: mjanson@163.com  
收稿日期 2008-08-12  
(田春雨 编发)

### (上接第 16 页)

[4] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB仿真[M]. 北京: 机械出版社, 2006.  
Nai-gang Hong. Power electronic and electric drive control system of the MATLAB simulation [M]. Beijing: Mechanical press, 2006.  
[5] Holtz J. Pulse width modulation - a survey [J]. IEEE Trans. On Ind. Electron., 1992, 39(5): 410- 420.  
[6] 林伟杰. 永磁同步电机两种磁场定向控制的比较[J]. 电力电子技术, 2007, 41(1):26- 28.  
Lin Wei-jie. Permanent magnet synchronous motor field-oriented control two comparison [J]. Power Electronics, 2007, 41 (1) : 26- 28.  
[7] Dubois M R, Polinder H, Ferreira JA. Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines [M]. IEEE Nordic Workshop on Power and

Industrial Electronics, 2000: 22- 26.  
[8] 李晶,王伟胜. 变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 电网技术, 2003, 27 (9): 14- 17.  
Li Jing, Wei-sheng Wang. Wind generators modeling and simulation [J]. Network technology, 2003. 27 (9) : 14- 17.  
作者简介:  
赵辉(1963-) 男,博士研究生,教授,从事电力电子控制技术方向的研究。Email: zhaohui3379@126.com  
鲁超(1984-) 男,硕士研究生,主要研究方向为电力电子控制技术及其在风力发电系统的应用。Email: lurchao624@163.com  
冯金钊(1985-) 男,硕士研究生,主要研究方向为电机控制与驱动。  
收稿日期 2009-04-03  
(杨长江 编发)