基于IGBT快速断电固态断路器在紧急避难设施应用的研究

煤矿井下一般采用普通电源和地面钻孔电缆双回路供电方式，正常生产情况下井下变压器供电，维持救生舱内部环境条件；当发生煤矿事故时，为保证供电系统在电源切换过程中产生的电弧、电火花不能引起瓦斯爆炸，必须保证切换时间小于3 ms。通过分析紧急避难设施负荷规律，建立等效数学模型并进行理论研究，为最终快速断电提供依据；同时提出以IGBT为基础的快速断电固态断路器拓扑，从理论及Matlab仿真上论证了拓扑的可行性，在实验室进行相关实验论证，保证断路器断电时间不超过1 ms。

王彦文　魏文强　赵永梅　高　峰／中国矿业大学（北京）机电与信息工程学院

王彦文／教授

关键词／Keywords
紧急避险 · 快速断电 · IGBT · Matlab ·

近年来，随着煤矿行业突飞猛进的发展，煤炭事故也时有发生，所造成的经济损失非常严重，对社会具有极大的震动，不仅影响着煤炭工业的形象，而且给工人及其家庭所带来的痛苦无法估计。因此如何保证井下工作人员人身安全成为煤矿安全生产中的重中之重。当发生煤矿事故、井下工作人员无法安全撤回地面时，避难硐室和救生舱可以为受困人员提供基本生存条件，最大限度地保证人员生命安全[1, 2]。

煤矿井下一般采用普通电源和地面钻孔电缆双回路供电方式，正常生产情况下由井下变压器供电，维持救生舱内部环境条件；当发生煤矿事故时，为保证供电系统在电源切换过程中产生的电弧、电火花不能引起瓦斯爆炸，必须保证切换时间小于3 ms[3, 4]。因此，本文通过分析紧急避难设施供电负荷规律，建立数学模型，提出利用以IGBT为基础的快速断电固态断路器实现快速断电这一目标。

国家科技撑计划课题（2012BAK04B00—2012BAK04B09）。

紧急避难设施供电负荷规律

1. 紧急避难设施电路拓扑

井下电力系统受事故影响可能会发生短路，在有瓦斯等易燃易爆气体时，极易发生爆炸等事故，对救生舱内人员生命造成重大伤害。因此救生舱的电源要由井下中央变电所切换为自备电源。由于电力系统中发生三相短路时情况最为严重，重点对井下电力系统发生三相短路进行研究。短路时救生舱电路如图1所示。

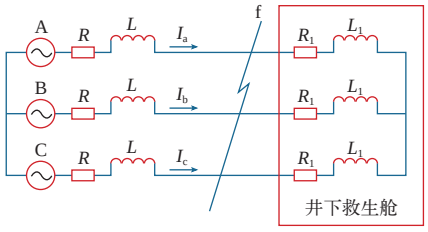


图1　井下电力系统发生三相短路故障时救生舱电路拓扑

2. 紧急避难设施电路分析

假定电源短路容量足够大，即认为系统为无限大电源容量系统。由于电路对称，只需研究一相即可（如A相）。短路前电路处于稳态，每一相的电阻和电感分别为$R+R_1$和$L+L_1$。A相相电压与相电流分别为

$$u = E_m \sin(\omega t + \psi) \quad (1)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi_d) \quad (2)$$

式中，$I_m = \dfrac{E_m}{\sqrt{(R+R_1)^2 + \omega^2 (L+L_1)^2}}$；$\varphi_d =$

中国知网　https://www.cnki.net

$\arctan\frac{\omega(L+L_1)}{R+R_1}$。

若f点发生三相短路，该电路被分为两个独立电路，其中左边电路仍与电源相连，而右边负荷电路变成没有电源的短接电路，电流从短路瞬间的初始值衰减至零。左侧电路每一相阻抗变为$R+j\omega L$，其电流将由短路前的数值逐渐变化到阻抗为$R+j\omega L$所决定的新稳态值。短路全电流包括周期分量和非周期分量，表达式为

$$i_d(t)=I_{dm}\sin(\omega t+\psi-\varphi)+[I_m\sin(\psi-\varphi_d)-I_{dm}\sin(\psi-\varphi)]e^{-t/\tau} \quad (3)$$

式中，$I_{dm}=\frac{E_m}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}$；$\varphi=\arctan\frac{\omega L}{R}$；$\tau=\frac{L}{R}$。

基于IGBT快速断电的固态断路器研究

1. 矿井快速断电安全原理

所谓快速断电安全技术是指当矿井低压供电系统发生短路故障时，保护装置能够在可能引起爆炸性介质燃烧或爆炸以前切断电源或用其他方式隔绝向故障点馈送能量，以达到系统“全方位”防爆安全的一整套安全技术与电气设备。其基本原理可表示为

$$T_0<T_x \quad (4)$$

式中，T_x为故障形成时间，是指从故障发生的瞬时至形成电火灾或故障电火外露引燃甲烷－空气混合物造成瓦斯爆炸等恶性事故的时间，根据前苏联斯柯钦斯基矿业研究所H. Φ. 什士金教授实验研究得出结论，矿井低压供电系统的最小故障时间为5 ms，所以取T_x为5 ms；T_0为全断电时间，是指从短路故障发生瞬时至故障点断电的全部时间。全断电时间$T_0=T_j+T_k$，其中T_j为故障信号的取样时间与继电保护动作时间之和，T_k为开关装置的全切断时间，希望快速断路器能够在1 ms内断开，为采样与继电保护动作争取时间。

2. 基于IGBT的快速断路器拓扑图

由于向救生舱供电的电力系统是中性点不接地的对称系统，所以通过关断A相与C相电流，就可以使三相系统电流完全关断，从而保证了当井下发生短路故障时，矿井供电系统与救生舱隔离，使救生舱避免因电弧引起爆炸事故，如图2所示[5]。

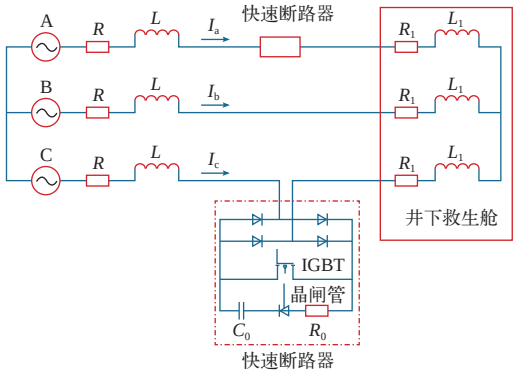


图2 基于IGBT快速断路器的井下电力系统救生舱电路拓扑

3. 快速断路器的关断过程

为了分析快速断路器的固有动作时间，必须研究其开断时的工作原理，尤其是故障保护切断时过渡过程的工作原理。当系统发生短路故障时，罗氏线圈电流传感器将冲击电流信号采集并传送给处理单元，当满足断电条件后，处理单元向IGBT VT_1发送关断指令，同时晶闸管VT_2导通。当VT_1关断后（电感电流不能突变），主回路的电流通过VT_2、R_0和C_0组成的缓冲回路续流，从而将短路电流降为零。如图3所示，只有VT_2关断以后，快速断路器才算真正关断。计算断路器的全关断时间t_d为IGBT关断时间t_{1off}与晶闸管的自关断时间t_{2off}之和。因此，IGBT主电路关断后，应求出辅助晶闸管VT_2的自关断时间[6]。

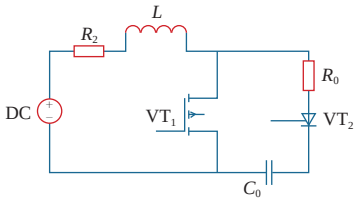


图3 IGBT关断时的等效电路

设IGBT关断的时刻记为$t=0_-$，按图3所示直流侧的等效回路分析研究过渡过程。根据此图可以写出微分方程

$$LC_0\frac{d^2u_C}{dt^2}+RC_0\frac{du_C}{dt}+u_C=E_m \quad (5)$$

式中，L为交流回路的等效电感；$R=R_2+R_0$，R_2为交流回路的等效电阻，R_0为缓冲回路中的放电电阻；

中国知网 https://www.cnki.net

C_0为关断电容器的电容；u_C为关断电容器的端电压。

通过对以上线性非齐次方程求解可得

$$u_c(t)=E_m+e^{-\delta t}(A_1\sin\beta t+A_2\cos\beta t) \quad (6)$$

流过VT_2的电流即电容电流$i_c(t)$，表达式为

$$i_{VT_2}(t)=C_0e^{-\delta t}\sqrt{(\delta A_1+\beta A_2)^2+(\beta A_1-\delta A_2)^2}\sin(\beta t-\varphi) \quad (7)$$

式中，$\delta=\frac{R}{2L_2}$；$\beta=\sqrt{\delta^2-1/(LC_0)}$；$A_1=\frac{1}{\beta C_0}[I'_{dm}-\delta C(E_m+U')]$；$A_2=-E_m$，$\varphi=-\arctan\frac{\beta LI'_{dm}}{E_m+U'_0-0.5RI'_{dm}}$。

$\tau=R_0C_0$，$I'_{dm}=i_d$（t_1时刻短路冲击电流），令$i_{VT_{2=0}}$，则有$\beta t-\varphi=\pi$，即

$$t_{2off}=\frac{\pi-\arctan\frac{\beta LI'_{dm}}{E_m-0.5RI'_{dm}}}{\beta} \quad (8)$$

$$t_d=t_{1off}+t_{2off}$$

对于本案例中：$L=6.58$ mH；$R=1.2$ Ω；$C_0=10$ μF；$u_C=50$ V；$i_d=160$ A；$t_{2off}=6.3$ ms。

4. 主电路IGBT的选用

当发生三相短路故障时，IGBT端会有较大冲击电压和电流，经过分析计算，本文选取ABB公司生产的型号为5SNE 0800M170100 的HiPakTM模块，其主要参数如下表所示，安全工作关断区间如图4所示。可以看出管子额定电压、额定电流均满足系统参数且有冗余；VT_1管子关断时间（t_{1off}）较短，可以保证快速断路器可靠工作[7]。

表　5SNE 0800M170100的最大额定参数

参数	符号	条件	最大值
集电极—发射极电压/V	V_{GES}	$V_{GE}=0$ V，$T_{vj}\geqslant25$ ℃	1 700
直流集电极电流/A	I_C	$T_C=80$ ℃	800
集电极峰值电流/A	I_{CM}	$t_p=1$ ms，$T_C=80$ ℃	1 600
关断延迟时间/ns	$T_{d(off)}$	$V_{CC}=900$ V，$i_C=800$ A $T_{vj}=125$ ℃	875
下降时间/ns	T_f	$V_{CC}=900$ V，$i_C=800$ A $T_{vj}=125$ ℃	185

Mtalab仿真分析

1. 井下电力系统正常工作

紧急避难设施由井下中央变电所供电，本案例电压等级为660 V。救生舱（紧急避难设施）中负荷包括矿用电灯，O_2、CO、CO_2、CH_4、压差、温度和湿度等传感器及其分站，人员位置监测分站以及调度电话机等负荷，通过分析可以将这些负荷简化为阻抗型负荷，即功率为3 000 W、功率因数为0.8的中性点不接地系统。当井下电网正常运行时，电缆中未加入快速断路器和加入快速断路器的仿真比较如图5和图6所示，由上至下分别为A、B和C三相的相电流（下同）。

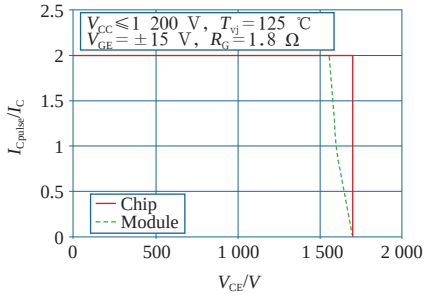


图4　IGBT安全关断区

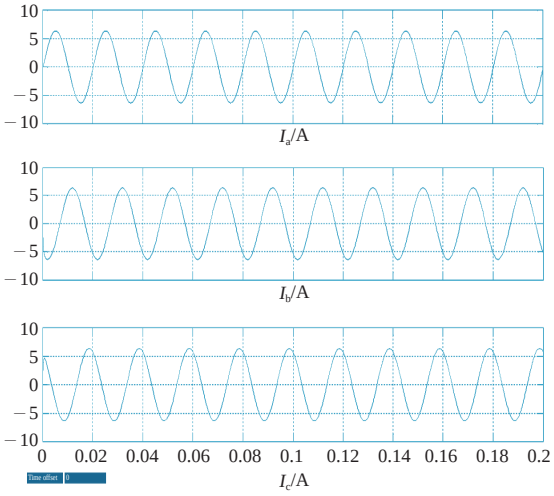


图5　系统未加入快速断路器时正常运行时的波形

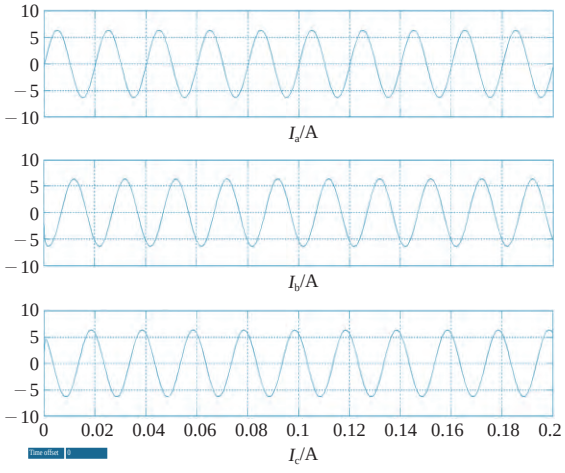


图6　系统加入快速断路器正常运行时的波形

中国知网　https://www.cnki.net

从图5与图6中可以得出，井下电网运行正常时，系统未加入快速断路器的波形与电缆加入快速断路器的波形基本一样，三相电流都正常。因此可以得知：在井下电力系统中，电缆A相与C相加入快速断路器对救生舱供电影响可以忽略，系统工作正常。

2. 井下电力系统发生三相短路故障

当井下电网发生三相短路故障时，电网中会出现很大的冲击电流，如图7所示。发生短路故障时为了及时将电网断电，在发生短路故障1 ms后，电缆A相与C相的快速断路器投入动作，其仿真结果如图8所示。

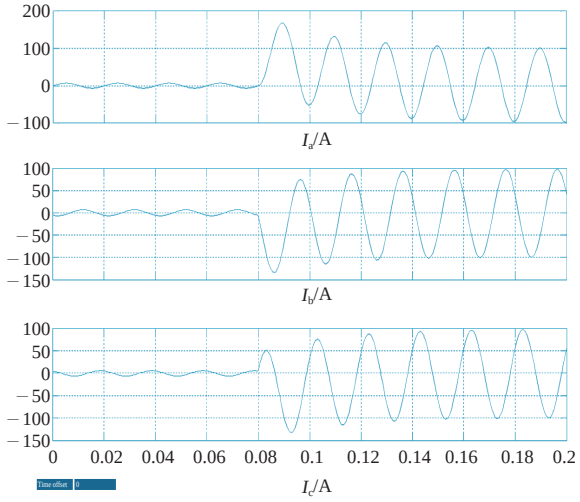


图7　系统未加入快速断路器三相短路运行时的波形

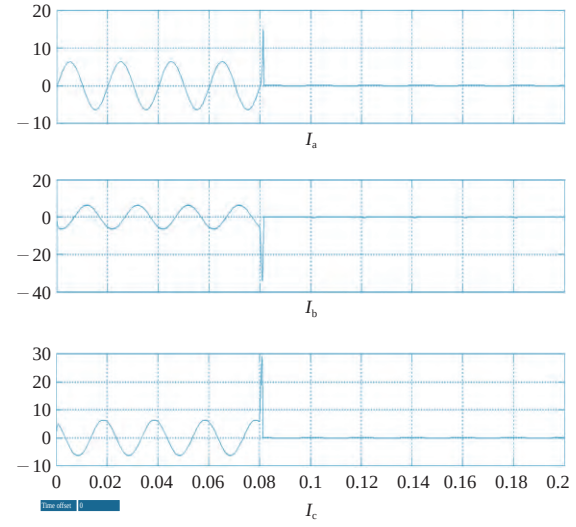
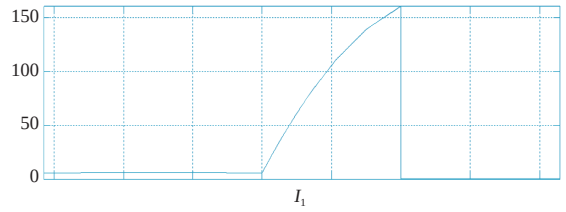


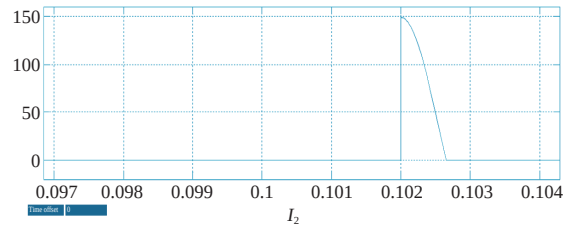
图8　系统加入快速断路器三相短路运行时的波形

从图7与图8中可以得出，当井下电网发生三相短路故障时，未加入快速断路器的系统产生很大的冲击电流，经过暂态过程系统进入新的稳态值。而在电缆A相与C相加入快速断路器后，冲击电流满足断路器断开条件，快速断路器快速动作，将A相与C相断开，B相也随之断路，从而使电网快速断电，保证了负荷安全。

图9a为流经IGBT的电流波形，图9b为流经晶闸管的电流波形。井下电网在0.1 s发生三相短路故障，经过2 ms后，IGBT关断，晶闸管导通，短路冲击电流经过*RC*缓冲电路迅速衰减，经过0.65 ms电流衰减至零，此刻电源与救生舱负荷断开，保证了救生舱里人员的安全。



（a）流经IGBT的电流波形



（b）流经晶闸管的电流波形

图9　流过IGBT电流与缓冲电路电流的波形

通过上述的Matlab仿真结果得出如下结论：

1）本文提出的井下快速断路器在电网正常运行时，基本对电网及负荷没有影响。

2）在井下电网发生短路故障时，IGBT快速断开，短路电流通过缓冲电路迅速衰减。IGBT关断时间$t_{1off}=0.1$ ms，晶闸管关断时间$t_{2off}=0.65$ ms，与理论计算所得6.3 ms接近，断路器全断电时间$t_d=0.75$ ms，电网及时关断电源，使救生舱避免因短路电流过大产生电弧所引发的瓦斯爆炸事故。

3）在井下电网通过加装两相（A相、B相）快速断路器，可以快速切断短路电流，达到三相均安装快速断路器的效果，并节约了资金。

中国知网 https://www.cnki.net

结束语

本文结合井下供电系统特点，提出了一种适用于井下的救生舱快速断电电路拓扑，通过整流桥将交流电转换为直流电，从而实现快速断电。快速断路器在井下电网正常运行时，电流通过整流桥流向负荷；在电网发生故障时，IGBT快速关断，短路电流通过缓冲电路迅速衰减至零。通过Matlab仿真验证了电网正常供电时，快速断路器接入电网对负荷没有产生不良影响，并能够在电网发生短路时使短路电流迅速衰减，关断电源，从而验证了该快速断路器的可行性。该快速断路器能够灵活地接入到井下救生舱电缆中，经济可行，具有良好的应用前景。

参考文献

[1] 丁祖军，郑建勇，梅军，等．基于DSP的IGBT固态断路器设计与优化[J]．电力自动化设备，2005，24（10）：55-57.

[2] 孙继平．煤矿井下避难硐室与救生舱关键技术研究[J]．煤炭学报，2011，36（5）：713-717.

[3] 冯源，郭忠文．固态断路器技术的应用[J]．电力自动化设备，2007，27（10）：96-99.

[4] 王彦文．快速断电安全技术[M]．北京：煤炭工业出版社，1996：116，122，129.

[5] 王彦文，李海洪．一种适用于煤矿供电系统的固态限流器[J]．工矿自动化，2013（10）：73-77.

[6] Supono I，Castellazzi A，Urresti J，et al．IGBT design optimisation for solid-state circuit breaker applications[C]．Power Electronics and Applications （EPE），2013 15th European Conference on．IEEE，2013：1-8.

[7] 张超，夏立．基于IGBT的直流混合型固态断路器及其换流过程[J]．低压电器，2004（9）：3-5.

（收稿日期：2014－07－01）EA

Weidmüller

魏德米勒工业以太网交换机
—工业网络高效可靠的通讯保障

魏德米勒工业以太网交换机，不仅延续了魏德米勒产品的一贯德国品质、卓越稳定的性能，而且将通讯解决方案再次扩容，并为您带来了全新的高效可靠、完善便捷的使用体验。

魏德米勒工业以太网交换机支持全百兆、千兆上联、全千兆传输速率，精确适应各类应用场合。其宽温-40°C~+85°C的设计，轻松应对极端环境条件。符合EMC四级、IP40的标准，满足严苛的工业现场需要。便捷易用的监控管理交互界面，帮助客户实时掌握全网状态。

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn

魏德米勒在华辉煌二十年

中国知网 https://www.cnki.net