

# 一种基于晶闸管整流器的直流牵引供电系统

陈 隆<sup>1</sup>, 周士琼<sup>1</sup>, 夏焰坤<sup>2</sup>

( 1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031;

2. 西华大学电气工程学院, 四川 成都 610039)

**摘 要:** 直流母线短路故障时, 直流侧进线短路电流剧增, 加大了直流侧进线断路器的开断难度, 再由于中国城市轨道交通的故障率上升, 导致直流侧进线断路器易损坏、寿命低。鉴于这个问题, 提出一种基于晶闸管整流器的直流牵引供电系统, 以晶闸管整流器完成整流和分合电路的功能, 可省却直流侧进线断路器以及缩短故障切除时间, 同时分析了其整流质量、谐波问题、进线短路电流和市场经济性问题。最后在 Matlab/Simulink 搭建仿真模型验证了该方案的可行性, 为提高直流牵引供电系统的整体性能提供参考。

**关键词:** 直流牵引供电系统; 晶闸管整流器; 直流侧进线短路电流; 仿真模型

**Abstract:** The short-circuit current of DC side line surges when DC bus has short-circuit fault, which increases the difficulty of breaking DC side line breakers. And because the fault rate of urban rail transit in China increases, the breakers of DC side line are easily damaged and have a short life. A DC traction power supply system based on thyristor rectifier is put forward according to the above-mentioned problems. The thyristor rectifier is used to complete the functions of rectification and switching the circuit. And the circuit-breakers of DC side line and the time to remove the faults can be saved. Then its quality of rectification, harmonic problems, line short-circuit current and the economic issues are analyzed. Finally, the simulation model is established in Matlab/Simulink to verify the feasibility of the proposed scheme, which can provide a reference for improving the overall performance of DC traction power supply system.

**Key words:** DC traction power supply system; thyristor rectifier; short-circuit current of DC side line; simulation model

中图分类号: TM721.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0054-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.03.012

## 0 引 言

与交流断路器相比, 直流断路器在切断故障时, 由于没有电流过零点, 因此, 熄灭电弧、耗散电弧能量以及抑制开断过电压等成为需要解决的难题。而这些问题也成为了直流断路器制造难度大、造价高、可靠性低的原因<sup>[1]</sup>。文献表明, 中国城市轨道交通领域使用的直流断路器依然依赖进口, 由于需要开断短路大电流电路, 中国城市轨道交通领域使用的直流断路器易损坏、寿命低, 这也大大增加了运营和维护的费用<sup>[2-3]</sup>。新型地铁直流断路器在中国多次被提出, 以电流转移法强迫电流过零使直流断路器开断的方法较为普遍, 但此方法始终没有解决断路器由于频繁分合故障电路而导致易损坏、寿命短的问题<sup>[4-8]</sup>。考虑到直流母线短路故障时, 直流侧进线短路电流剧增, 加大了直流侧进线断路器的开断

难度, 以及中国城市轨道交通的故障率上升, 提出了一种基于晶闸管整流器的直流牵引供电系统, 把交流进线断路器的分合电路功能与二极管整流器的整流功能等效改进成晶闸管整流器的功能, 以克服机械开关的机械和电气寿命短的问题, 可省却直流侧进线断路器并快速切除直流母线短路故障, 从而进一步提高牵引供电系统的整体性能。

## 1 一种基于晶闸管整流器的直流牵引供电系统

### 1.1 直流牵引供电系统的介绍

如今城市轨道交通一般都采用 24 脉波整流, 其供电系统结构图如图 1 所示。2 台变压器原边采用 d 接法, 次边采用 y 接法和 d 接法, 保证阈值线电压形成 30° 相差; 变压器网侧采用三角形延边接法, 分别移相 ±7.5°, 保证其阈值线电压相差 15°<sup>[11]</sup>。4 台三

相全波整流机组分别整流后在直流侧进行并联运行 构成 24 脉波整流机组。其阈值电压向量图如图 2 所示。

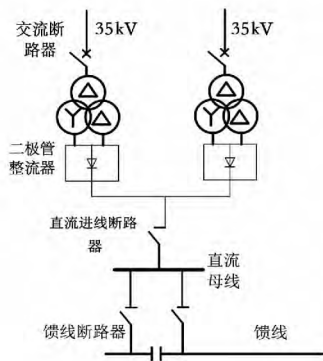


图1 直流牵引供电系统结构图

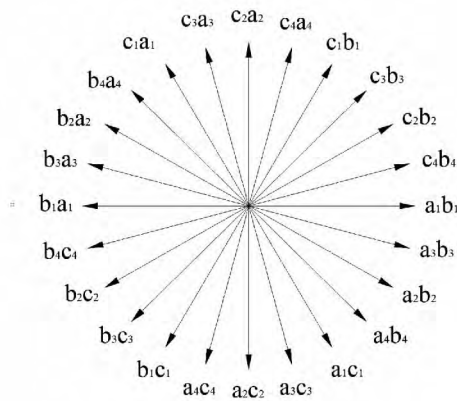


图2 阈值电压向量图

即有直流牵引供电系统系统正常运行时,牵引变电所由电力系统 35 kV 侧取电流,经降压变压器降压、二极管整流器整流,最后获得接触网 1 500 V 的工作电压。当直流侧发生故障时,系统通过直流侧的直流断路器开断电路,当故障切除时,断路器合闸,系统继续运行。

### 1.2 方案提出

由于城市轨道交通故障频繁,二极管整流器直流侧的直流断路器频繁分合故障电路;特别是直流母线发生短路故障时,直流进线短路电流剧增,增大了直流进线断路器的开断难度,导致故障切除时间长且直流进线断路器易损坏、寿命低;加之直流断路器开断电路时,没有电流过零点,熄弧成本高,偶尔会出现误开断。基于此类问题,提出了一种基于晶闸管整流器的直流牵引供电系统。基于晶闸管整流器的直流牵引供电系统结构图如图 3 所示。系统正常运行时,晶闸管整流器跟二极管整流器相同,完成整流功能,获得接触网 1 500 V 的工作电压。当系统发生母线短路故障时,关断信号经触发电路输送

至脉冲发生器;此时脉冲发生器停止产生触发脉冲,晶闸管封锁,交流侧线电压过零,晶闸管承受反压、电流下降至维持电流后晶闸管关断,晶闸管整流器停止工作;且两馈线断路器开断,待故障切除后,触发信号输送到晶闸管门极,晶闸管承受正向阳极电压时晶闸管导通,晶闸管整流器恢复正常工作。

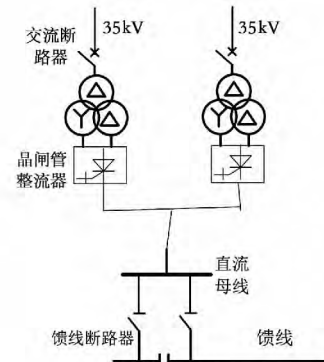


图3 基于晶闸管整流器的直流牵引供电系统结构图

图 3 所示的晶闸管整流器相当于二极管整流器和交流电子开关,其可以完成整流和分合电路的功能。与城市轨道交通使用的直流进线断路器相比,晶闸管整流器是一种无触点开关,可快速开断大电流电路,解决了直流断路器开断时产生电弧的问题,理论上开关损耗为零,其寿命长且与关断、导通的次数无关,同时可避免使用断路器开断直流进线大短路电流并缩短了故障切除的时间。

## 2 方案可行性分析

该方案中的晶闸管整流器可完成整流与分合电路的功能。整流则需考虑整流质量与其对电网的影响,直流侧电压质量和谐波是其考虑的指标。系统发生故障时,开断电路必须考虑其故障电流,特别是直流进线短路电流。基于此对其直流母线进线短路电流以及电网侧与直流侧的谐波进行分析,此外,还对其市场经济性进行分析。

### 2.1 直流侧进线短路电流分析

系统直流母线发生短路故障时,其危害最大。假设直流母线发生短路故障,关断信号送至晶闸管脉冲发生器的时间一般为十几毫秒,晶闸管未能及时关断,此时短路电路图如图 4 所示。

系统的电路方程为

$$E = RI + L \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

式中:  $R$ 、 $L$  为换算至直流侧的电阻和电感;  $I$  为直流

进线短路电流;  $E$  为系统直流侧电源 1 500 V。若发生短路故障时直流母线进线电流为 0 A, 则直流进线短路电流为

$$I = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{Rt}{L}}) \quad (2)$$

代入参数计算可知, 进线短路电流会在极短的时间内上升到极大的值, 这对直流牵引供电系统和配电设备危害极大。

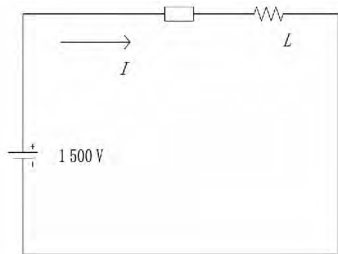


图 4 短路电路图

当关断信号送至晶闸管脉冲发生器时, 由于流过晶闸管的电流并未小于晶闸管的维持电流, 晶闸管并未立即关断, 电感通过晶闸管放电, 其放电电路图如图 5 所示。

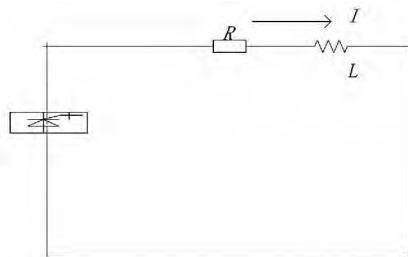


图 5 放电电路图

此时系统的电路方程为

$$RI + L \frac{dI}{dt} = 0 \quad (3)$$

假设晶闸管接收到关断信号的时间为  $t_1$ , 电感电流初值为

$$I_- = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{Rt_1}{L}})$$

此时直流侧进线电流为

$$I = I_- e^{-\frac{R(t-t_1)}{L}} \quad (4)$$

将参数代入式(4), 经过几毫秒, 直流侧进线电流将会下降至晶闸管的维持电流, 晶闸管关断, 此时直流侧进线电路得以切除。如果进线短路电流无法在  $2/3$  周期内下降至 0 A, 则直流侧进线电流无法降至晶闸管维持电流, 此时, 晶闸管承受正压, 继续导通, 直流侧进线电流以式(2)的方式回升, 经过半个周期, 直流侧进线电流以式(2)的方式开始跌落。

具体分析方式如下: 假设晶闸管再次导通的时间为  $t_2$ , 电路方程如式(3), 此时电感的初始电流为

$$I_{t_2} = I_- e^{-\frac{R(t_2-t_1)}{L}}$$

则直流侧进线电流为

$$I = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{R(t-t_2)}{L}}) + I_{t_2} e^{-\frac{R(t-t_2)}{L}} \quad (5)$$

经过半个周期后, 直流侧进线电流开始下跌, 电路方程如式(4), 此时电感的初始电流为

$$I_{t_2+0.01} = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{R \times 0.01}{L}}) + I_{t_2} e^{-\frac{R \times 0.01}{L}}$$

则直流侧进线电流为

$$I = I_{t_2+0.01} e^{-\frac{R(t-t_1)}{L}} \quad (6)$$

由式(2)、(4)、(5)、(6)可以看出, 在系统发生短路故障时, 如果晶闸管封锁不及时, 直流侧进线短路电流降为 0 A 的时间将延迟, 导致开断直流进线电路的时间延长, 将数据代入式(2)、(4)、(5)、(6)计算, 此时间约为 30 ms, 与直流断路器的分闸时间持平。在系统  $R/L$  合理的情况下, 如无特殊情况, 不会出现短路电流振荡的情况。待故障修复后, 晶闸管整流器再次工作, 保障了系统的安全运行。从系统发生故障到晶闸管开断进线短路电路共花时间十余毫秒, 比直流断路器关断速度快, 且晶闸管为交流开关, 不存在电流不能过零的问题, 从这两方面考虑, 所提出的方案可行。

## 2.2 谐波分析

所提出的基于晶闸管整流器的直流牵引供电系统只用到了晶闸管整流器的封锁功能, 其余的性能跟二极管整流器无异, 因此其谐波分析与二极管整流器相同。  $n$  脉波整流会在直流侧产生  $k \times n$  次谐波, 而在电网侧产生  $k \times n \pm 1$  次谐波, 在地铁普遍使用 24 脉波整流中, 假设输出负载为阻性, 其直流侧电流的傅里叶级数为

$$i_d = \frac{24}{\pi} \sin \frac{\pi}{24} I_{dm} (1 \pm \sum \frac{1}{n^2 - 1} \cos n\omega t) \quad (7)$$

式中:  $n = 24 \times k$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ );  $I_{dm}$  为整流器交流侧线电压峰值,  $V$ ; 当  $k$  取奇数时, 式(7)取正号, 反之, 式(7)取负号。由式(7)可以算出直流侧电流的谐波  $\text{THD} = 0.26\%$ 。

电网侧电流的傅里叶级数为

$$i = \frac{6I_{dm}}{\pi} [(1 + \frac{2\pi}{3\sqrt{3}}) \cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 23\omega t + \frac{1}{13} \cos 25\omega t - \dots] \quad (8)$$

由式(8)可以看出,注入电网的谐波主要有  $k \times 24 \pm 1$  次。代入参数计算,电网侧谐波电流 THD 约为 4.3%,超出了国家的谐波标准 3%,需要治理。而在现阶段,谐波治理技术在地铁上已经相当成熟,可以极大程度地削减谐波分量。

晶闸管整流器采用移相控制,因此,晶闸管整流器较二极管整流器的稳流精度高,与此同时,晶闸管整流器注入电网的谐波电流较大,需要谐波治理装置,而所提出的方案只需采用晶闸管整流器中晶闸管的封锁功能,即收到关断信号时停止晶闸管的脉冲触发,整流质量及谐波情况与二极管整流器无差别,因此,考虑整流质量及谐波问题,所提出的方案可行。

### 2.3 市场经济性分析

以 ABB 元器件为例,单台整流机组采用晶闸管比二极管造价增加 60~70 万元,但采用二极管整流器必须配饱和电抗器,饱和电抗器的参考报价为 150 万元/台,加之考虑断路器高昂报价以及其易损坏和寿命低的特点,显然所提出的方案较经济。此外,晶闸管整流技术在国内已较为成熟,其可在大电压、大电流中工作,因此,考虑市场经济性,所提出的方案可行。

## 3 仿真验证

在 Matlab/Simulink 搭建按如图 1 和图 3 的系统模型,图 1 的系统采用的是 24 二极管 24 脉波整流器,原理如章节 1.1 介绍,图 3 的系统采用的是 24 脉波晶闸管整流器,由两组 12 脉波的晶闸管整流器并联<sup>[9-10]</sup>,仿真时间为 0.2 s。0.1 s 时系统直流母线发生短路故障,如果直流进线断路器不动作,则直流母线电压和进线电流波形如图 6 所示。

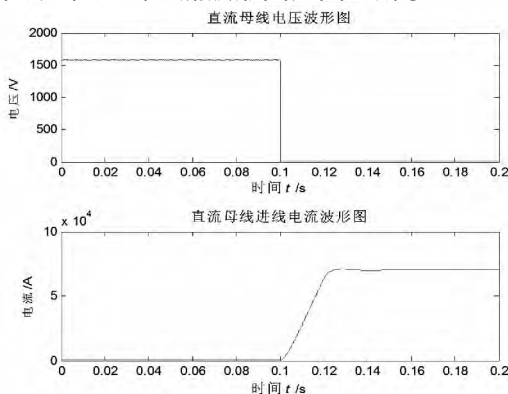


图 6 直流断路器不动作时直流母线电压和进线电流波形图

由图 6 可以看出,直流母线进线电流在短时间内迅速增大到 70 000 A,而直流母线电压在直流母线发生短路后随电流变化而变化,由于短路的过渡电阻为 0.000 1  $\Omega$ ,因此电压变化幅度是电流的 0.000 1 倍。

如果直流进线断路器为理想开关,在 30 ms 后完成开断,则直流母线电压和进线电流如图 7 所示。

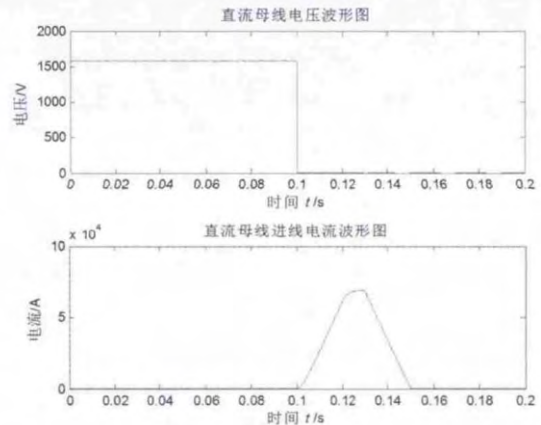


图 7 30 ms 直流进线断路器断开时直流母线电压和进线电流波形图

由图 7 可以看出,经过一个周期后,短路电流已经上升至 70 000 A,这对直流牵引供电系统的危害极大,同时也加大了直流进线断路器开断的难度。

由于晶闸管的动作时间极快,为微秒级别,因此忽略其动作时间。当晶闸管整流器在 0.11 s 接收封锁信号时,直流母线进线电流波形如图 8 所示。

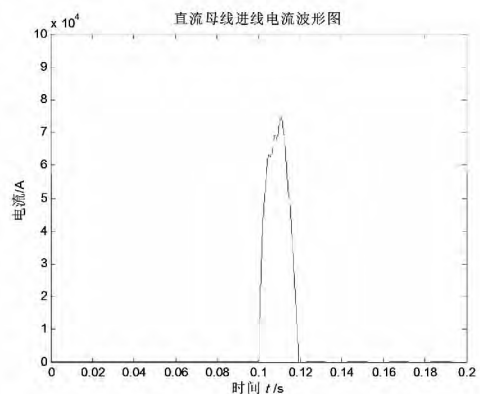


图 8 0.11 s 接收封锁信号时直流母线进线电流波形图

由图 8 可以看出,直流侧电流波形在 0.1 s 时有明显的上升趋势,其增长趋势与式(2)描述的趋势相同。在 0.11 s 时,电流开始下降,在 0.12 s 时,电流下降为 0 A,与式(4)描述的趋势相同;从晶闸管接收封锁信号至直流侧电流下降为 0 A,总耗时 10 ms。

当晶闸管整流器在 0.12 s 接收封锁信号时,直流母线进线电流波形如图 9 所示。

由图 9 可以看出,晶闸管整流器在 0.12 s 接收封锁信号时,直流母线进线电流曲线的趋势与二极管整流器在 0.11 s 接收封锁信号时相似,但由于延迟了 10 ms,导致直流母线进线短路电流上升了 10 000 A。从晶闸管封锁至直流侧电流下降为 0 A,总耗时为 10 ms。

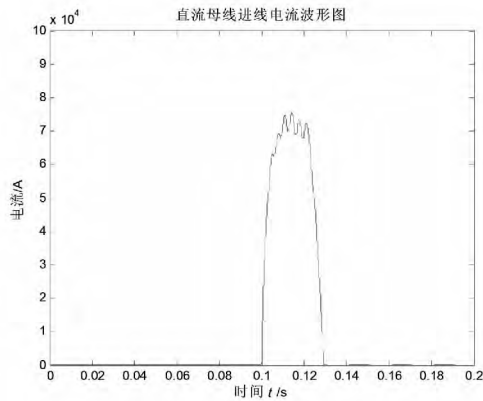


图9 0.12 s 接收封锁信号时直流母线进线电流波形图

当晶闸管整流器在 0.13 s 接收封锁信号时,直流母线进线电流如图 10 所示。

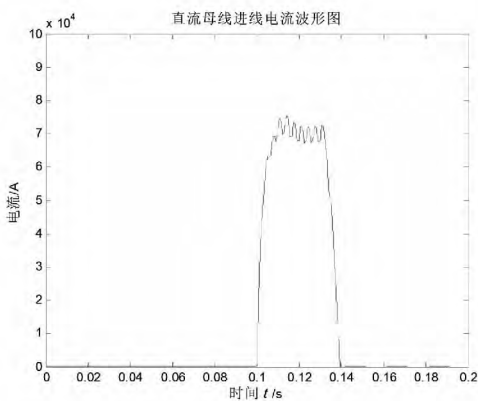


图10 0.13 s 接收封锁信号时直流母线进线电流波形图

由图 10 可以看出,晶闸管在 0.13 s 接收封锁信号时,直流母线进线电流上升到了稳态值 70 000 A,在 0.13 s 时,电流开始下降直至 0.14 s 变为 0 A,从晶闸管接收封锁信号至直流侧电流下降为 0 A,总耗时为 10 ms。

由上述分析可知,由晶闸管整流器接收封锁信号至短路电流下降为 0 A 只需 10 ms,而直流断路器的分闸时间为 25 ~ 30 ms<sup>[1]</sup>,即有线所使用的直流断路器断开故障电路的时间为 50 ms 左右<sup>[12]</sup>,该方

案大大缩短了开断母线短路故障的时间,同时,也可以省却直流进线断路器,因此,该方案可使用于城市轨道交通领域。

当系统没有发生故障时,晶闸管整流器与二极管整流器相似,完成整流功能,图 11 为晶闸管整流器和二极管整流器 35 kV 侧电流波形图、直流侧电压波形图。表 1 为晶闸管整流器和二极管整流器 35 kV 侧、直流侧谐波含量表。

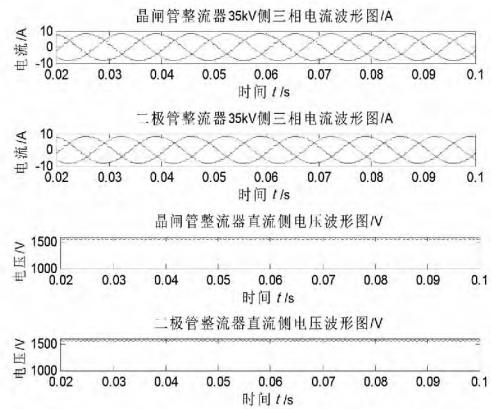


图11 35 kV 侧电流波形图、直流侧电压波形图

表1 35 kV 侧、直流侧谐波与幅值表

	35 kV 侧谐波 THD / %	直流侧谐波 THD / %	直流侧电压 分量 / V
二极管整流器	3.85	0.49	1 577
晶闸管整流器	3.86	0.50	1 576

由图 11 和表 1 可以看出,晶闸管整流与二极管整流的整流质量与谐波相同。根据式(6)计算,直流侧电压的直流分量为 1 580 A,由表 1 可以得出其整流误差为 1.33%。晶闸管的整流效果较好。晶闸管整流器注入 35 kV 侧的谐波过大,超过了国家的谐波标准 3%,需要安装谐波治理装置。仿真验证与理论相符。通过仿真验证,该方案可以较好地完成整流以及快速开断故障电路的功能。

## 4 结 语

所提出的一种基于晶闸管整流器的直流牵引供电系统,以晶闸管整流器完成整流和分合电路的功能,可省却直流进线断路器以及缩短故障切除时间。与城市轨道交通即有线使用的直流断路器相比,晶闸管整流器寿命更长,更加经济,开断故障电路的时

(下转第 94 页)

负荷时不需要开启再循环阀,只有在汽泵“并泵”、“退泵”期间才会使用,再循环阀以微开状态造成汽蚀的时间几乎为“0”。

2) 汽泵节能效果明显。机组运行中汽泵再循环阀一直处于关闭状态,且阀门内漏现象得到改善,基本杜绝了再循环阀的回流损失。

3) 避免了因汽泵再循环阀开启造成的给水流量突降,保证了低负荷时锅炉给水流量的稳定性和安全性。

再循环阀按照新的控制策略运行后汽泵运行参数稳定,实践证明是可行的。在目前燃煤机组总体负荷率偏低,长时间低负荷运行的现状下,新的控制策略能带来更明显的经济效益。

参考文献

[1] 赖加良,戈黎红.超临界机组给水泵最小流量控制方

(上接第 58 页)

间更短。经仿真验证,晶闸管整流器大大缩短了开断进线短路电路的时间,且较好地完成了整流的功能;但 35 kV 侧电流谐波偏大,需要安装谐波治理装置,而谐波治理技术在中国城市轨道交通领域的使用中已经相当成熟;因此,所提出的基于晶闸管整流器的直流牵引供电系统可为新建城轨线路提供参考。

参考文献

[1] 贺威俊.轨道交通牵引供变电技术[M].成都:西南交通大学出版社,2011.  
[2] 喻乐.城市轨道交通供电系统建模与直流馈线保护的研究[D].北京:北京交通大学,2012.  
[3] 邱有杰,朱国钧.用于轨道交通的国产化直流快速断路器及直流接触器[J].上海电器技术,2003(2):42-43.  
[4] 周宏宇.新型地铁用直流断路器研究[D].长沙:湖南大学,2010.  
[5] 周宏宇,罗隆福,许加柱,等.改进型地铁用直流断路器[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(2):127-130.  
[6] 董恩源,丛吉远,邹积岩,等.1500V船用新型直流

法的改进[J].发电设备,2009,23(5):358-360.

[2] 邹世浩,万胜军.超临界最小流量调节阀的研究[J].锅炉制造,2013(6):62-64.  
[3] 钱绍斌.给水泵再循环阀异常处理[J].电力安全技术,2010,12(1):49-50.  
[4] 阎志敏.给水泵再循环阀的设计与控制[J].发电设备,2008,22(4):332-334.  
[5] 刘长良,周丹.660MW单列辅机超超临界机组给水控制策略优化[J].电力科学与工程,2013,29(9):43-46.  
[6] 王志强,李忠杰,李金铖.给水泵最小流量再循环阀控制方法的改进[J].河北电力技术,2011,30(6):41-44.

作者简介:

侯剑雄(1975),高级工程师,从事火电厂生产技术与管理工作。

(收稿日期:2016-01-15)

断路器的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(5):153-156.

[7] 董恩源.基于电子操动的快速直流断路器的研究[D].大连:大连理工大学,2004.  
[8] 高银银.地铁用直流断路器灭弧方案的研究[D].成都:西南交通大学,2013.  
[9] 董海燕,田铭兴,杜斌祥,等.地铁24脉波整流机组的仿真及谐波电流分析[J].电源技术,2011,35(5):593-594.  
[10] 杨阳.城市地铁系统建模及时间优化方案研究[D].上海:上海交通大学,2013.  
[11] 陈海军,程小华.地铁整流机组相量图及输出波形分析[J].变压器,2006,43(8):17-21.  
[12] 邵岩.基于RTDS的地铁牵引供电系统建模与仿真[D].成都:西南交通大学,2014.

作者简介:

陈隆(1991),硕士研究生,研究方向为电力系统分析;  
周士琼(1992),硕士研究生,研究方向为电力电子控制;  
夏焰坤(1986),博士、讲师,研究方向为电力系统控制。

(收稿日期:2016-01-10)