

基于双边供电的直流牵引 馈线保护研究

李建民

(郑州铁路职业技术学院 机车车辆系,河南 郑州 450052)

摘要:城市轨道交通直流供电系统保护存在诸多问题,例如保护的设置、保护范围及相互配合等。鉴于此,结合实际运行情况建立了双边直流馈线保护的电路模型和数学模型,并指出了一些重要参数选择计算方法,为分析直流馈线保护提供了一种算法。通过这种算法,分析了配置的原理,研究了各种保护之间的关系,分析了保护和牵引电机之间的关系,详细研究了 di/dt 和双边联跳保护,精确地计算出各保护时间的数值。最后,指出直流馈线保护采用大电流脱扣保护近端、 di/dt 和 ΔI 保护中远端和直流双边联跳越区保护等基本满足目前直流馈线保护的要求。采用所建立的电路模型和数学模型,其分析结果和实际运营分析情况相符合,与现场的实验分析也符合。

关键词: 双边供电; 直流系统; 馈线保护; 整定方法

中图分类号: TM 922.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)11-0055-05

1 直流牵引馈线保护配置

1.1 概况

早期的直流供电系统采用 DC 750 V 第 3 接触轨受电,且缺少性能优越的保护装置,一般仅设电流速断和过电流保护,由于短路电流相对较小,短路电流很难与牵引负荷电流区分开,保护效果不理想,为此增加了直流双边联跳保护。

DC 1500 V 一般采用高架接触网供电,直流馈线的保护配置应保证直流供电系统正常及越区供电情况下接触网在近端、中部及远端发生短路故障时均能快速跳闸。不同的地铁牵引供电系统,其保护配置可能不同,但保护的作用都是相同的。目前,随着技术的进步,直流馈线保护配置已经相当完备,基本满足了系统的要求。特别是增加了 di/dt 和 ΔI 保护后,效果很好。

1.2 保护配置

DC 1500 V 架空接触网授电,在牵引变电所近端发生故障时,短路电流很大,电流速断和过电流保护可以切除故障;当故障发生在牵引变电所的中、远端时,短路电流相对变小,电流速断和过电流保护可能不会动作,采用反映故障电流上升率 di/dt 和电流增量 ΔI 的保护可以切除故障。因此,在直流牵引供电系统中,配备大电流脱扣保护、 di/dt 和 ΔI 保护、直流双边联跳保护和低电压保护,能保证安全、可靠的供电要求。

直流牵引供电系统通过快速断路器来切除故障,快速断路器本身装有大电流脱扣,它对近端短路故障较灵敏。大电流脱扣保护利用磁脱扣原理,所

以短路点距变电所越近,电流数值越大,断路器的脱扣跳闸时间越短,即具有反时限特性。直流快速断路器所具有的这些特性,能使断路器在接触网发生近端短路时快速跳闸,迅速切除故障。故选择直流快速断路器本体的大电流脱扣保护,作为接触网近端短路的主保护。

由以上分析可知,对于中、远端短路故障,大电流脱扣保护也可能启动,但由于中、远端短路电流小,因此大电流脱扣保护动作时间相对较长,对故障切除不利,就需由 di/dt 和 ΔI 保护动作来尽快切除故障。因此选择反应电流上升率 di/dt 和电流增量 ΔI 保护,作为接触网中、远距离短路故障的主保护。

为了保证直流供电的安全、可靠,直流馈线还可配置定时限过电流保护和低电压保护,作为大电流脱扣、 di/dt 和 ΔI 保护的后备保护。直流馈线还设置双边联跳保护,当某一端直流馈线开关保护动作时,通过直流双边联跳保护,可使对侧馈线断路器跳闸。

总而言之,直流牵引供电系统馈线保护利用大电流脱扣保护近端,利用 di/dt 和 ΔI 保护中远端,利用直流双边联跳进行越区保护,其它保护作为后备保护^[1-6]。

2 直流馈线保护分析的电路模型和数学模型

城市轨道交通牵引供电系统直流馈线保护除了满足保护的基本要求外,还应保证满足高密度列车运行的要求,一般为 3~5 min 一辆,有的甚至间隔 2 min 一辆。此外还要保证接触网发生短路时,应能迅速跳闸,保证列车的安全和旅客的人身安全,及时切除故障。同时当列车内部发生故障时,应首先保证故障列车上的断路器跳闸,直流牵引变电所的直流断路器不应跳闸而应能够继续向非故障列车供电,以尽量

减少对行车的影响。直流牵引变电所和列车上都装有直流断路器,不过,直流牵引变电所的直流断路器分断容量大,而列车上的直流断路器分断容量小。一般车辆上,每组列车由 4 个动车和 2 个拖车组成,每个动车上安装 1 个直流断路器,其中带驾驶室的动车上安有受电弓,每个受电弓下各带 2 个直流断路器,1 个备用。关于车辆和馈线大电流保护配合,主要是在大小数值上加以区别^[7]。

直流牵引供电系统电路模型可描述为一个直流电流供电系统。当短路发生时其等效回路为一个直流电源和电阻 R 、电感 L 的串联回路,如图 1 所示。

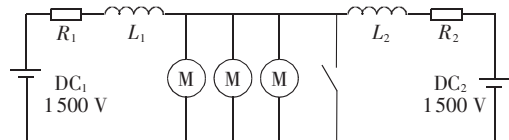


图 1 直流牵引供电系统电路模型

Fig.1 Equivalent circuit of DC traction power supply system

开关突然合闸,表示突然发生短路事故。因为合闸的瞬间,相当于施加了一个交流电源,故而考虑到了线路的电感。当开关合闸时,相当于发生了短路事故。短路回路非常复杂,可能有几种方式:一是直接接到大地上,通过大地流到架空地线上,流回变电所;二是直接接到钢轨上,通过钢轨对地的泄漏电阻流到架空地线上,流回变电所;三是接到架空地线上,直接流回变电所。其中,接地电阻大小也被等效到了 R 中。由图 1 可知,其数学模型为^[8-9]

$$L \frac{di}{dt} + Ri = 1500 \quad (1)$$

可以整理为

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L}i = \frac{1500}{L} \quad (2)$$

根据一阶非齐次方程 $y' + p(x)y = Q(x)$ 的解的结构得:

$$y = e^{-\int p(x)dx} \int Q(x)e^{\int p(x)dx} dx + Ce^{-\int p(x)dx} \quad (3)$$

因为 $e^{-\int p(x)dx} = e^{-\frac{R}{L}t}$, 则

$$i = e^{-\frac{R}{L}t} \int \frac{1500}{L} e^{\frac{R}{L}t} dt + Ce^{-\frac{R}{L}t} \quad (4)$$

整理后得到:

$$i = Ce^{-\frac{R}{L}t} + e^{-\frac{R}{L}t} \left(\frac{1500}{R} e^{\frac{R}{L}t} + C \right) = Ce^{-\frac{R}{L}t} + \frac{1500}{R} \quad (5)$$

由于短路的瞬间,可以设定短路电流为 0,故此可得到 $t=0$ 时 $i=0$ 的初始条件: $0 = C + 1500/R$, 可以得到 $C = -1500/R$, 代入式(5)得:

$$i = \left(-\frac{1500}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{1500}{R} = \frac{1500}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (6)$$

这是短路电流和时间的关系,说明随着时间的延长,短路电流逐渐增大。因为瞬间发生短路时,相当于施加交流电源,阻抗较大,故电流较小,但随着系统的稳定,阻抗将大幅下降,故而电流增加。

由于 R 的值比较小,故在保护装置的始端开始电流很大。但因为 R 的值随着远离变电所而越来越大,故短路电流的数值下降得也越来越快。在中、远端,由于 R 较大,使得短路电流变小,几乎无法和正常负荷加以区别,所以电流速断和过电流保护都不会动作。由此得到 2 个结论:短路电流随时间的延长而逐渐增大,而随到距离变电所距离的增加而加速下降。距离变电所越远,电流越小。

在此基础上可以得到: $\frac{di}{dt} = \left(-\frac{1500}{R} \right) \left(-\frac{R}{L} \right) e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{1500}{L} e^{-\frac{R}{L}t}$, 其变化规律如图 2 所示。

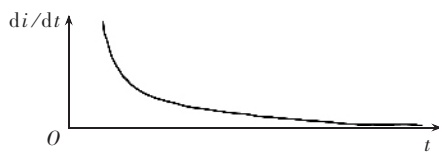


图 2 di/dt 和时间的关系

Fig.2 Relationship between di/dt and time

从图中可知, di/dt 随时间逐渐减小,最后稳定下来,几乎为零,此时电流达到最大值。

3 di/dt 和过电流、大电流脱扣、 ΔI 时间和数值的整定配合研究

3.1 di/dt 和过电流的时间研究

设 E 为 di/dt 的动作值,由于 $L = L_0 d$, $R = r_0 d$, d 是故障点到保护安装点的距离, L_0 、 r_0 分别是馈线单位长度的电感和电阻值。

根据以上公式得:

$$\frac{1500}{L_0 d} e^{-\frac{r_0}{L_0}t} = E \quad (7)$$

$$e^{-\frac{r_0}{L_0}t} = \frac{L_0 d}{1500} E$$

$$-\frac{r_0}{L_0}t = \ln \left(\frac{L_0 d}{1500} E \right), \quad t = -\frac{L_0}{r_0} \ln \left(\frac{L_0 d}{1500} E \right)$$

这个时间就是到达保护装置起始门限 E 的时刻。

由于真空的导磁系数 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, 架空接触线的半径 $r = \sqrt{S}/\sqrt{\pi}$, 架空接触线的相对导磁系数为 $\mu_r = 1$, 查相关技术参数知架空接触线的单位长度的电阻 $r_0 = 0.12 \Omega/\text{km}$, h_d 表示接触线高度, 则可得下式^[10]:

$$L_0 = \frac{\mu_r \mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_d}{r} = \frac{\mu_r \mu_0}{2\pi} \ln(2h_d \sqrt{\pi}/\sqrt{S}) =$$

$$2 \times 10^{-7} \ln(2h_d \sqrt{\pi}/\sqrt{S})$$

又因为

$$\frac{di}{dt} = \left(-\frac{1500}{R} \right) \left(-\frac{R}{L} \right) e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{1500}{L} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (8)$$

由此可知 di/dt 的最大值为

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{\max} = \frac{1500}{L} = \frac{1500}{L_0 d} \quad (9)$$

还知道 di/dt 是随时间逐渐减小的, 时间到无穷大

的时候 di/dt 几乎等于零(理想状态)。

代入实例 $d=2000\text{ m}$, $S=150\text{ mm}$, 采用 TJ150, 它由 19 股铜接触线组成, 每股直径 3.15 mm , 接触线高 $h_d=5\text{ m}$, 则 $r_0=0.12\text{ }\Omega/\text{km}$, $L_0=1.455\times 10^{-6}\text{ H/m}$ 。

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{\max} = \frac{1500}{L_0 d} = 515460 (\text{A/s}) = 515.46 (\text{A/ms})$$

就是在线路的末端, 可能出现的最大电流变化率为 515.46 A/ms , 即在线路的末端, 短路瞬时出现的电流变化率为 515.46 A/ms 。这个数值大小和实际情况基本相符。

将上述条件代入式(6)(7)得到末端短路电流及其变化率的公式为

$$\frac{di}{dt} = \frac{1500}{L_0 d} e^{-\frac{r_0}{L_0} t} = 515460 e^{-\frac{r_0}{L_0} t} = 515460 e^{-82.76 t}$$

$$i = \frac{1500}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L} t} \right) =$$

$$\frac{1500}{2 \times 0.12} (1 - e^{-82.76 t}) = 6250 - 6250 e^{-82.76 t}$$

假如过电流保护整定值设在 6000 A , 则 $6000 = 6250 - 6250 e^{-82.76 t}$, 解得 $t = 0.03889\text{ s}$, 即故障发生后 38.89 ms 继电保护设备开始动作。对于 di/dt 和 ΔI 保护, 若其整定值设在 40 A/ms , 延时 $t_d = 20\text{ ms}$; $\Delta I = 2250\text{ A}$, 延时 $t_d = 10\text{ ms}$, 则有 $4000 = 515460 e^{-82.76 t}$, 解得其开始动作时间为 $t = 58\text{ ms}$ 。但是过电流的动作时间为 0.5 s , 而 di/dt 的动作时间只有 20 ms 。因此从故障开始发生到切除, 过电流总的反应时间为 $0.03889\text{ s} + 0.5\text{ s} = 0.53889\text{ s}$, 而 di/dt 总的反应时间为 $0.058\text{ s} + 20\text{ ms} \approx 0.058\text{ s}$, 即 di/dt 在远端比过电流反应要快得多。同时可以看出 di/dt 切断故障的快慢主要取决于开始动作时间的长短, 而开始动作时间的长短主要取决于 di/dt 整定值 E 的大小, E 越大, 开始动作时间越长。因此 E 不能取得太大, 但也不能取得太小, 否则会引起误跳闸。而过电流切断故障的快慢主要取决于保护自身的动作时间, 因此它的整定值只要能按要求保护全长即可, 也就是说确保末端发生断路时, 可靠跳闸。

3.2 di/dt 整定值 E 的研究

从式(8)(9)可知, $(di/dt)_{\max}$ 的曲线变化规律如图 3 所示。

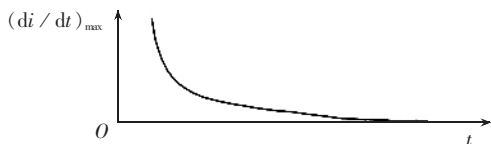


图 3 电流变化率的最大值随时间的变化曲线

Fig.3 Curve of $(di/dt)_{\max}$ vs. time

由式(8)(9)还可知, 电流变化率的最大值和位置有关, 在所有的电流变化率的最大值中, 其中最小的一个最大值出现在供电的末端。在供电的最末段发生短路时, $1500/L$ 的值也非常大(按照本模型计算的数据为 515460 A/s)。又因为其最小值不容易

确定, 因此, 常以车辆启动时的最大电流变化率为标准进行整定。

同理, 可以得出电动车组启动时的电流和启动时的变化率。 R_M 为交流电机的电阻, 如果是几个并联, R_M 应为几个交流电机的电阻的并联值。如果是 4 个交流电机形成的电动车组, 则应取 $R_M/4$ 。

正常行驶时, 假定接触网电压为 U , 根据电机的结构, 可以分析得到:

$$U = i R_M + L_M \frac{di}{dt}$$

其中, R_M 是其等效电阻; L_M 是其等效电感。则流过机车的电流 i 满足下式:

$$i = \left(-\frac{U}{R_M} \right) e^{-\frac{R_M}{L_M} t} + \frac{U}{R_M} = \frac{U}{R_M} (1 - e^{-\frac{R_M}{L_M} t})$$

而电动车组启动瞬间的电流变化率为

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_G = \frac{U}{L_M} e^{-\frac{R_M}{L_M} t}$$

式中 下标 G 为车辆电机。

时间为零时的变化率为

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{\max} = \frac{U}{L_M}$$

由此可得出: 对于同一地点, 电动车组启动时的电流变化率小于短路时的电流变化率。只要 di/dt 整定值大于 $(di/dt)_{\max} = U/L_M$, 由于 $L_M = 50 \times 10^{-6}\text{ H}$, 则 $(di/dt)_{\max} = 30000\text{ A/s}$ 。

为避免车辆启动时引起该保护的误动作, di/dt 设置了 F 值, E 值和 F 值应满足如下要求: E 值选取要满足 $t=0$ 时的 di/dt 值大于 E , 而 di/dt 的保护返回 F 值应选取车辆启动时的电流变化率。这样既可以躲过车辆启动引起误动作, 又可以保证可靠地切除末端的故障^[11]。

基于以上分析, 若 di/dt 保护选择 40 A/ms , 延时 $t_d = 20\text{ ms}$, 则 40 A/ms 小于末端 di/dt 的值 515.46 A/ms , 而大于 $(di/dt)_{\max} = 30000\text{ A/s}$ 就可满足要求。

3.3 di/dt 和 ΔI

当 di/dt 和 ΔI 都满足动作要求时, 一般由于 di/dt 时间延时较长, 而 ΔI 时间延时较短, 因此 ΔI 首先作用于直流断路器, 使直流断路器分闸, 即从满足条件开始到受控设备开始动作。如 di/dt 和 ΔI 整定值为: 40 A/ms , 延时 $t_d = 30\text{ ms}$; $\Delta I = 4000\text{ A}$, 延时 $t_d = 5\text{ ms}$ 。对于比较近的短路故障, ΔI 因为会很快满足条件, 因此率先动作。而对于比较远的短路故障, ΔI 在特定的时间内, 没有满足要求, 但如果判断出此时 di/dt 大于车辆启动时的电流变化率, 就立即动作切除故障^[12]。

4 双边联跳与 di/dt 和 ΔI 的时间配合

对于采用双边供电的接触网, 它是广泛使用的一种保护手段。当采用双边供电时, 一个供电区内的接触网由 2 个变电所对其供电, 向动车组提供电源,

当其中一个所的直流馈线断路器因为某些保护跳闸的同时,还会发出联跳指令,使得为同一个供电区供电的直流馈线断路器都跳闸。

它能切除故障电流特别小的远端短路故障,跳闸命令是由感知到较大近端短路故障电流的相邻站发出的。只要给一段接触网供电的 2 个牵引变电所,有一个正确跳闸,另一个也会立刻跳闸,因而可靠性很高,确保满足 GB50517-92《地下铁道设计规范》的第 8.2.21 条“在事故状态下接触网短路电流的保护,应保证单边供电接触网区段一条馈线的开断和双边供电接触网区段两条馈线的开断”。下面介绍双边联跳保护的原理。

图 4 显示了一条接触网的两段,左边一段由牵引变电所 A 和 B 供电,右边一段则由 B 站和 C 站供电。图中 G 为电动隔离开关,D 为直流快速开关,m 为电分段,当短路点发生在靠近 A 变电所的 f 位置时,A 变电所的大电流脱扣保护首先动作,而 B 变电所则由于短路电流小等因素,大电流脱扣和 di/dt 等保护均无法动作,位于 A 变电所的双边联跳保护则发出联跳命令,将 B 变电所的 213 开关跳开。这样就把整个故障区间切除了。如果此时 B 变电所已经退出运行时,则 B 变电所越区隔离开关已经合上,双边联跳保护将根据 B 变电所 2133 的位置判断,此时该区段由 C 变电所越区供电。那么 A 变电所通过电缆发出命令,让另一端的 C 变电所的 213 开关跳闸^[13]。

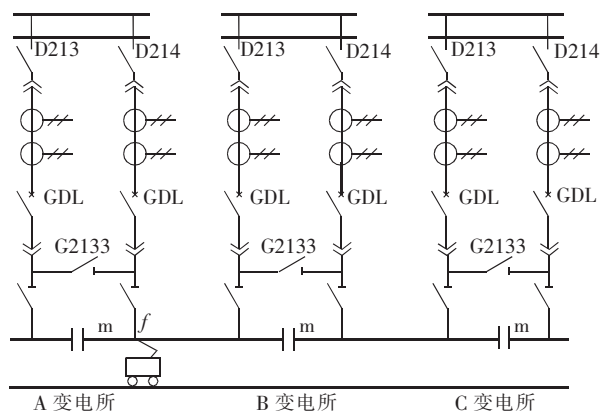


图 4 双边联跳保护

Fig.4 Transfer inter-trip protection

考虑一个极限状态,短路事故发生在 A 变电所附近,而且 C 变电所对列车进行越区供电,也就是 B 变电所全部停电。根据保护设置,A 变电所直流馈线断路器跳闸,时间为 4 ms。由于此时 B 变电所已经退出运行,而且故障也超越了 C 变电所的范围。此时只能由双边联跳来实现对端跳闸。

对于 B 变电所而言,根据一般的供电距离, $d=2000\text{ m}$,而电信号的传播速度近似等于光速,因此所需时间为

$$t = 2000\text{ m} / 3 \times 10^8 = 666.66 \times 10^{-8} = 6.66 \times 10^{-6}\text{ s} = 6.66 \times 10^{-3}\text{ (ms)}$$
,这个时间加上直流断路器的固有跳闸时间,就是从发生故障开始到把故障切除所用的

时间,因为大电流脱扣所用的时间为 $3 \sim 4\text{ ms}$,因此总的时间也就基本相当于大电流脱扣所用的时间,大大缩短了切除远端故障的时间,提高了切除故障的速度。因此安装双边联跳,对于及时切除故障具有重大意义。

目前我国双边联跳是采用电缆来实现的,这种方式简单、直观、可靠。随着光缆应用的普及和低成本化以及抗干扰能力强,已出现采用光缆取代电缆实现联跳。35 kV 电缆的差动保护采用光缆而双边联跳不采用光缆,是因为当牵引变电所大双边供电时,电缆联跳回路能够简单地随着大双边供电方式的切换而自动切换,光缆联跳回路也能够实现切换,但相对复杂一点。

5 结论

通过所建立的数学模型和电路模型,确定了各种参数,在此基础上重点分析了 di/dt 和 ΔI 保护^[14],也分析了其和其它各种保护之间的内在关系,特别是时序上的关系,为今后保护的设置和优化提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 周捷,宋云翔,徐劲松,等. 直流牵引供电系统的微机保护测控探讨[J]. 电网技术,2002,26(12):57-60.
ZHOU Jie, SONG Yun-xiang, XU Jin-song, et al. Discussion on measurement and control of computer based protective relaying for DC traction power supply system [J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 57-60.
- [2] 徐劲松,高劲,江平,等. 浅析地铁直流牵引变电所的保护原理[J]. 电气化铁道,2003(4):41-44.
XU Jin-song, GAO Jin, JIANG Ping, et al. Analysis the theory of protection in subway DC power supply system [J]. Electric Railway, 2003(4): 41-44.
- [3] 张华英. 地铁直流牵引供电系统保护配合的探讨[J]. 电气化铁道,2001(3):8-9.
ZHANG Hua-ying. Research on configuration of protection in subway DC power supply system [J]. Electric Railway, 2001(3): 8-9.
- [4] 王广峰,孙玉坤,陈坤华. 地铁直流牵引供电系统中的 DDL 保护[J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(1):59-62.
WANG Guang-feng, SUN Yu-kun, CHEN Kun-hua. The protection of DDL in subway DC power supply system [J]. Proceedings of the EPSA, 2007, 19(1): 59-62.
- [5] 丁丽娜,韩红彬. 地铁直流牵引供电系统馈线保护方法研究[J]. 现代电子技术,2005(5):87-89.
DING Li-na, HAN Hong-bin. Research on protection method of feeder line in subway DC traction supply system [J]. Modern Electronics Technique, 2005(5): 87-89.
- [6] 蔡彬,陈德桂. 城市轨道交通直流供电的控制和保护系统[J]. 低压电器,2000(6):21-24,31.
CAI Bin, CHEN De-gui. The control and protection system in DC power distribution system for mass transit railway [J]. Low Voltage Apparatus, 2000(6): 21-24, 31.
- [7] 张振森. 城市轨道交通车辆[M]. 北京:中国铁道出版社,1998.
- [8] 同济大学数学教研室. 高等数学(下册)[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,1996.

- [9] 邱关源. 电路[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,1999.
- [10] 管致中,沙玉军,夏恭恪,等. 电路、信号与系统(上册第二分册)[M]. 北京:人民教育出版社,1980.
- [11] 李建民. 城市轨道交通牵引供电[M]. 成都:西南交通大学出版社,2007.
- [12] 张建根,蔡波. 地铁直流牵引系统短路试验与保护配合[C]//地下铁道论文集. 深圳:海天出版社,1999:170-174.
ZHANG Jian-gen,CAI Bo. Short circuit experiment and protection cooperation of DC power supply in subway[C]//Paper Collection of Underground. Shenzhen:Haitian Publisher,1999:170-174.
- [13] 郑瞳芷,张明锐. 城市轨道交通牵引供电系统[M]. 北京:中国铁道出版社,2003.

- [14] 刘璟. 地铁直流供电保护系统保护算法的研究[J]. 计算机测量与控制,2007,15(1):71-72,96.
LIU Jing. Research of protection arithmetic in subway DC power supply protection system[J]. Computer Measurement & Control,2007,15(1):71-72,96.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

李建民(1966-),男,河南浚县人,副教授,主要从事电气工程和技术方面的教学和研究工作(E-mail:lijianmin 662000@yahoo.com.cn)。

Research of DC feeder protection based on bilateral power supply system

LI Jian-min

(Zhengzhou Railway Vocational and Technical College,Zhengzhou 450052,China)

Abstract: There are many problems in DC feeder protection for subway supply system,such as protection configuration,protective region and protection cooperation. The mathematical models and electric models of DC bilateral feeder protection are established according to the actual condition and the calculation methods of important parameters are presented,which offers a method for DC feeder analysis. With this method,the configuration principle is analyzed and the relations among various protections and between DC protection and electric traction engine are researched. The di/dt protection and inter-trip protection are studied particularly and the time settings are precisely calculated. It is pointed out that, the application of over-current protection for nearby end, di/dt protection and ΔI protection for middle and beyond ends,DC inter-trip protection and other kinds of protection can meet the current needs of DC bilateral feeder protection. The analytical results by the proposed mathematical and electric models match up to both operating and experimental results.

Key words: bilateral power supply; DC system; feeder line protection; setting method