

轨道交通长距离用电设备直流配电方案研究

纪焕聪^{1,2}, 夏成军^{1,2}, 王泽青^{1,2}, 赖胜杰^{1,2}

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

2. 广东省新能源电力系统智能运行与控制企业重点实验室, 广东 广州 510663)

摘要: 针对轨道交通长距离用电设备常规配电方案存在造价高、电压质量差等问题, 提出一种长距离用电设备直流配电技术方案, 以达到提高电压质量、降低工程造价的目的。首先, 结合轨道交通长距离用电设备种类多、分布广、可靠性要求高的特点, 对直流配电系统的电压等级、供电容量、拓扑结构等关键技术进行深入分析。然后, 对适用于低压配电领域的换流器关键参数给出设计原则和计算方法, 在此基础上, 提出了电压协调控制策略, 以保证电压的稳定性。最后, 基于PSCAD/EMTDC仿真验证了所提技术方案的有效性。此外, 考虑用电设备的不同配电距离, 对常规方案和直流方案的工程造价进行比较, 研究结果表明直流配电经济性优势明显, 该技术方案对今后轨道交通长距离配电的规划、设计具有一定的指导价值。

关键词: 轨道交通; 长距离配电; 直流配电系统; 模块化多电平换流器; 电压控制策略

中图分类号: TM721.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24582

Research on DC Power Distribution Scheme for Long-distance Electrical Equipment of Rail Transit

Ji Huancong^{1,2}, Xia Chengjun^{1,2}, Wang Zeqing^{1,2}, Lai Shengjie^{1,2}

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

2. Guangdong Provincial New Energy Power System Intelligent Operation and Control Enterprise

Key Laboratory, Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: Aiming at the problems of high cost and poor voltage quality in the conventional power distribution scheme of long-distance electrical equipment of rail transit, a technical scheme of DC power distribution for long-distance electrical equipment was proposed to achieve the purpose of improving voltage quality and reducing project cost. First of all, combining with the characteristics of long-distance electrical equipment of rail transit, such as many types, wide distribution and high reliability requirements, the key technologies such as voltage level, power supply capacity and topology structure of DC power distribution system were deeply analyzed. Then, the design principles and calculation methods were given for the key parameters of the converter suitable for low-voltage power distribution. On this basis, a voltage coordination control strategy was proposed to ensure the stability of the voltage. Finally, the effectiveness of the proposed technical scheme was verified based on PSCAD/EMTDC simulation. In addition, considering the different distribution distances of electrical equipment, the engineering cost of the conventional scheme and the DC scheme was compared. The research results show that the economic advantage of DC power distribution is obvious. In the future, the technical scheme has certain guiding value for the planning and design of long-distance power distribution of rail transit.

Key words: rail transit; long-distance power distribution; DC power distribution scheme; modular multilevel converter(MMC); voltage control strategy

在城市群一体化背景下, 市域快线将在联系城市核心区与重要城镇中发挥关键作用^[1-2]。由于市区与郊区相隔较远, 可能存在某些站间距过

大, 区间存在大量电动机类负荷(排水泵、风机等)。为了使末端用电设备电压质量满足要求, 文献[3-4]以长距离电动机设备为例, 采用增大电

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B111109001)

作者简介: 纪焕聪(1997—), 男, 硕士研究生, Email: 742860106@qq.com

通讯作者: 夏成军(1974—), 男, 博士, 副教授, Email: cjxia@scut.edu.cn

缆截面或就地无功补偿的措施来解决电压损耗较大的问题,虽然电压质量有所提高,但无法解决工程造价高的问题。文献[5-6]针对电动机设备启动时电流和电压暂降较大的问题,提出了Y- Δ 降压启动、软启动、带变频器启动等启动方式,虽然改善了启动时电压质量问题,但在电动机稳态运行时其电压质量仍无法满足要求,故仍需增大电缆截面。以上文献表明常规配电方案直接采用大截面电缆将电能从低压配电所传输至负荷侧,并结合一些电机启动方式,可改善末端电动机的电压质量,但该配电方案不仅电能损耗大,而且工程造价高。因此,亟需提出一种轨道交通长距离用电设备新型配用电技术方案。

直流输电具有损耗低、灵活可控、电压质量高等优点,在远距离高压输电领域已得到广泛应用^[7-9]。低压直流配用电是高压直流输电的进一步延伸,目前已有大量学者开展了相关工作。文献[10]研制了一种背靠背低压直流配电装备样机,分析了直流电压不稳定的机理,并提出了相应的直流电压控制策略。文献[11-12]探索了低压直流配用电在民用建筑中的初步应用,开展了低压直流配用电电压等级选择、拓扑结构设计、“光储直柔”等研究,阐述了低压直流配用电的技术经济优势。文献[13]分析了民用建筑中低压直流配用电的短路故障特性,并提出了相应的保护措施,提高了系统的可靠性。文献[14]针对低压直流配用电的安全性问题,提出了考虑电压约束和单极转供能力的安全域计算方法,得出单极转供能力有利于提高系统安全性。文献[15]对苏州中压直流配电示范工程的设备选型、拓扑结构设计等进行深入分析,所得结果可为其它工程的设计提供参考。文献[16-17]对低压直流配用电系统的运行与控制、装备、接地方式等6个方面的关键技术进行了总结,充分说明了直流配用电的优越性,并提出了今后直流配用电领域的重点研究方向。

综上所述,低压直流配用电在民用建筑、工业园区等领域的成功应用,表明了低压直流配用电技术的可靠性和安全性较高,可实现源荷的灵活互动,便于光伏、风电等新能源的接入,以达到节能减排的目的。而低压直流配用电技术在轨道交通领域鲜有应用,为此,本文对低压直流配用电技术在轨道交通长距离配用电领域的应用开展研究,结合轨道交通长距离用电设备的特

点,对直流配电方案的关键技术进行深入分析。然后,给出了模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)的关键参数设计原则及计算方法,并提出电压协调控制策略,以提高系统电压的稳定性。最后,基于PSCAD/EMTDC软件仿真验证所提方案的有效性,并分析比较两种方案的经济性。

1 常规配电方案分析

1.1 轨道交通长距离用电设备

城市轨道交通工程低压配电进线由主变电所35 kV引来,经降压变电所降压为0.4 kV,为管理用房、站厅、站台、区间的机电动力负荷和照明灯具等设备提供电能。在城市轨道交通工程中,变电所一般位于负荷中心,但也存在距离负荷较远的情况,应用场景有地下长大区间、出入段线U型槽、车辆段等,需从变电所远距离配电。以上应用场景的用电设备包括风机、水泵、照明等,用电设备种类多、分散广,且一、二级负荷占总负荷的70%以上,对供电可靠性要求较高。根据《GB 50055—2011通用用电设备配电设计规范》第2.2.2节的规定,照明设备电压偏差要求为+5%~-10%,而电动机类设备启动时电压降较大,约为30%,故配电母线上不直接接入照明负荷^[18]。因此,本文主要对长距离电动机类负荷的配电方案开展研究。

1.2 常规配电方案分析

常规配电方案通常直接采用电缆将电能从降压变电所输送至负荷侧,由于末端电动机设备(风机、水泵等)为一级负荷,需采用双回路进行供电,其配电示意图如图1所示。

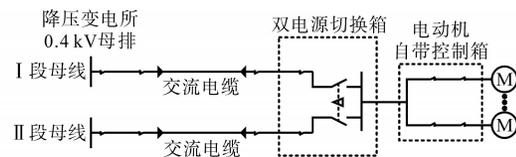


图1 常规配电方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of conventional power distribution scheme

通过上文分析确定轨道交通长距离区间用电设备主要为电动机类设备,为了使电动机类设备启动电压降及稳态运行电压质量满足要求,对于常规配电方案,其线路电压降计算如下:

$$\begin{aligned} \Delta u_{ac} \% &= \frac{\sqrt{3}}{10u_n} (R'_0 \cos\varphi + X'_0 \sin\varphi) I l \\ &= \Delta u_a \% I l \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $I = Pl / (\sqrt{3} u_n \cos\varphi)$

式中: $\Delta u_{ac}\%$ 为交流线路电压降百分数; I 为负荷计算电流; l 为线路长度; P 为负荷功率; u_n 为标称线电压; $\cos\varphi$ 为设备功率因数; $\Delta u_a\%$ 为三相线路每 $1 \text{ A}\cdot\text{km}$ 的电压损失百分数; R'_0, X'_0 分别为三相线路单位长度的阻抗和感抗。

为了满足末端用电设备电压质量的要求,常需采用大截面电缆进行供电,导致工程造价较高。

2 直流配电技术方案分析

2.1 直流配电系统拓扑结构

为解决常规配电方案电压损耗大、工程造价高的问题,提出一种轨道交通长距离用电设备直流配电方案。图2为一种轨道交通长距离用电设备直流配电方案拓扑结构图,电能从降压变电所引出,经整流装置将交流电变为直流电,通过直流电缆将电能输送至末端,在线路末端经逆变装置将直流电变换为交流电,供电动机设备使用。由于MMC换流器谐波含量低、输出电压质量高,且MMC换流器扩展性强、占地面积小,在隧道区间可节约大量土建造价,故本文选用MMC换流器开展相关研究。

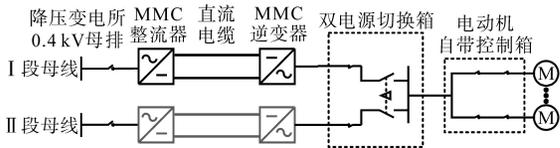


图2 直流配电系统拓扑结构图

Fig.2 DC distribution system topology diagram

根据直流线路电压降可初步确定电缆的截面大小,直流线路电压降计算公式如下:

$$\Delta u_{dc}\% = \frac{2R'_{dc0}}{10U_{dc}^2} Pl = \frac{Pl}{CS} \quad (2)$$

其中 $C = 5\gamma U_{dc}^2$

式中: $\Delta u_{dc}\%$ 为直流线路电压损失百分数; R'_{dc0} 为直流线路单位长度电阻; U_{dc} 为直流电压等级; C 为计算系数; γ 为线路导电率; S 为线芯标称截面积。

2.2 直流电压等级的选择及供电容量分析

常用低压直流配电电压等级有 $1\ 500 \text{ V}$, $1\ 000 \text{ V}$, 750 V 和 400 V , 而直流电压等级的选择要求遵循优化电压等级、简化电压层级的原则^[19-20]。结合轨道交通长距离用电设备的特点及电压等级要求,同时考虑到直流电缆绝缘和继电保护设备的要求,本文选取直流电压等级为 750 V 。

在进行直流配电方案设计时,有必要对其供

电容量进行分析,以说明直流配电系统的优越性,直流供电系统容量与交流系统容量之比如下式所示:

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{U_{DC} I_{DC}}{\sqrt{3} U_{AC} I_{AC} \cos\varphi} \quad (3)$$

式中: P_{DC}, P_{AC} 分别为直流线路和交流线路的有功功率; U_{DC} 为直流电压; I_{DC} 为直流系统额定电流; U_{AC}, I_{AC} 分别为交流供电系统的额定电压、额定电流。

假设交直流系统所用电缆类型相同,即线路绝缘水平一致,在不考虑交流的集肤效应和操作过电压问题时,有 $I_{DC} = I_{AC}$, 本文取 $\cos\varphi = 0.9$, 则式(3)可改写为

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{750 \times I_{AC}}{\sqrt{3} \times 380 \times I_{AC} \times 0.9} \approx 1.27 \quad (4)$$

式(4)表明,直流配电方式的供电容量大于交流配电方式。在工程上,由于直流电缆的阻抗小于交流电缆的阻抗,此外,考虑交流电缆的集肤效应,则有 $I_{DC} > I_{AC}$, 实际上直流供电容量与交流供电容量之比大于 1.27 , 更加凸显了直流配电的优越性。

3 MMC参数设计及控制策略

目前,MMC换流器主要用于高压直流输电领域,为了满足低压配用电的要求,有必要对适用于轨道交通长距离配用电领域的换流器参数进行设计。另外,针对直流配电技术方案下用电设备电压稳定的问题,逆变侧换流器采用定交流电压控制,可维持电压在额定电压附近,故在电缆选型时只需满足载流量即可,所需电缆截面可大大减小。

3.1 MMC换流器关键参数设计

MMC换流器的拓扑结构如图3所示,图中, L_0 为换流器桥臂电感, U_{dc} 为直流电压, SM 为子模块, U_c 为子模块电压, C_0 为子模块电容。

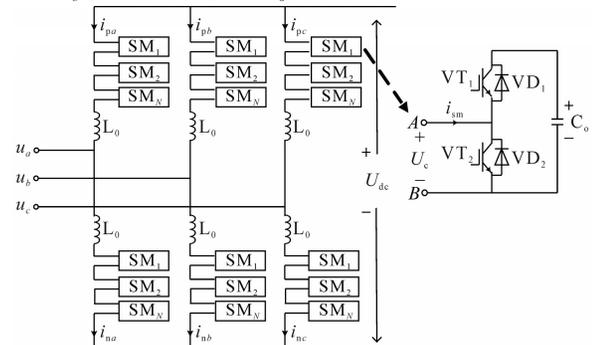


图3 MMC换流器拓扑结构

Fig.3 MMC converter topology

MMC换流器的子模块数量和子模块电容大小应根据系统电压等级及容量来确定。MMC桥臂子模块数量主要与绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)所能承受的电压等级有关,且MMC每个桥臂应能承受所分摊到的所有直流电压,并留有一定的裕度。简化分析可知每个桥臂级联的子模块数为

$$N \geq \frac{U_{dc}}{U_c} \quad (5)$$

对于MMC子模块电容大小的选取,必须考虑系统最严重的运行工况,此时电容电压波动幅度最大。为此,选择子模块电容值的目的是为了抑制电容电压波动,而实际情况中电容值是有限的,电容电压存在波动,因此应选择尽可能小的电容值以满足电容电压波动率的要求。根据子模块电容储能与电压的关系,简化分析可得子模块电容储能的最大变化量为^[21]

$$\Delta W_{c0}(m) = \frac{2}{3} \frac{S_v}{mN\omega} \left[1 - \left(\frac{m\cos\varphi}{2}\right)^2\right]^{3/2} \quad (6)$$

式中: S_v 为MMC换流器的视在容量; m 为MMC输出电压调制比; ω 为系统角频率。

考虑电容电压波动率的影响,可得子模块电容的最大储能和最小储能如下:

$$\begin{cases} W_{c0,max} = \frac{1}{2} C_0 [U_c (1 + \varepsilon)]^2 \\ W_{c0,min} = \frac{1}{2} C_0 [U_c (1 - \varepsilon)]^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $W_{c0,max}$ 为子模块电容最大储能; $W_{c0,min}$ 为子模块电容最小储能; ε 为子模块电容电压的波动率。由式(7)可得子模块电容储能最大变化量的另外一个计算公式为

$$\Delta W_{c0}(m) = W_{c0,max} - W_{c0,min} = \frac{1}{2} C_0 U_c^2 (4\varepsilon) \quad (8)$$

联立式(6)和式(8),可得电容电压波动率为

$$\varepsilon = \frac{1}{3} \frac{S_v}{mN\omega C_0 U_c^2} \left[1 - \left(\frac{m\cos\varphi}{2}\right)^2\right]^{3/2} \quad (9)$$

ε 一般取为10%。

进一步可求得所需子模块电容的最小值为

$$C_0 = \frac{1}{3} \frac{S_v}{mN\omega\varepsilon U_c^2} \left[1 - \left(\frac{m\cos\varphi}{2}\right)^2\right]^{3/2} \quad (10)$$

桥臂电抗器参数的选择主要从其作用考虑,桥臂电抗器的作用主要有以下3点:①桥臂电抗器作为换流器与交流系统交换功率的媒介,对注入交流系统的电流有平滑作用,能够抑制网侧电压不平衡引起的负序电流;②可用来抑制环流;

③在换流器或直流侧发生故障时,可抑制故障电流的上升率。综合考虑以上因素,分析可知本文所需最小桥臂电抗值为^[22]

$$L_0 = \frac{5N}{48\omega^2 C_0} \quad (11)$$

3.2 整流侧换流器控制策略

整流侧有功控制有定直流电压控制和定有功控制,为了保证直流电压稳定,选用定直流电压控制,其功率外环控制瞬时表达式为

$$\begin{cases} \Delta V_{dc}(t) = V_{dref} - V_{dc}(t) \\ i_{dep}(t) = k_{dep} \Delta V_{dc}(t) \\ i_{dci}(t) = k_{dci} \frac{\Delta V_{dc}(t) + \Delta V_{dc}(t - \Delta t)}{2} \Delta t + i_{dci}(t - \Delta t) \\ i_{dref} = i_{dep}(t) + i_{dci}(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: V_{dref} 为直流电压参考值; $V_{dc}(t)$ 为直流电压瞬时值; $i_{dep}(t)$, $i_{dci}(t)$ 分别为定直流电压控制的PI控制器输出参考值的比例分量和积分分量; k_{dep} , k_{dci} 分别为定直流电压控制的比例、积分系数; i_{dref} 为经功率外环控制生成的d轴电流参考值。

无功控制有定交流电压控制和定无功控制,但电动机类负荷在不同运行阶段无功需求不同,故采用定交流电压控制较为合适,以保证低压母线电压稳定,其功率外环控制瞬时表达式为

$$\begin{cases} \Delta U_{ac}(t) = U_{acref} - U_{ac}(t) \\ i_{acp}(t) = k_{acp} \Delta U_{ac}(t) \\ i_{aci}(t) = k_{aci} \frac{\Delta U_{ac}(t) + \Delta U_{ac}(t - \Delta t)}{2} \Delta t + i_{aci}(t - \Delta t) \\ i_{qref} = i_{acp}(t) + i_{aci}(t) \end{cases} \quad (13)$$

式中: U_{acref} 为交流电压参考值; $U_{ac}(t)$ 为交流电压瞬时值; $i_{acp}(t)$, $i_{aci}(t)$ 分别为定交流电压控制的PI控制器输出参考值的比例分量和积分分量; k_{acp} , k_{aci} 分别为定交流电压控制的比例、积分系数; i_{qref} 为经功率外环控制生成的q轴电流参考值。

功率外环输出的 i_{dref} , i_{qref} 经电流内环控制器处理,得到d,q轴参考电压的瞬时表达式如下:

$$\begin{cases} u_{dref} = u_d - [k_{dp}(i_{dref} - i_d) + k_{di} \int (i_{dref} - i_d) dt] + \omega L i_q \\ u_{qref} = u_q - [k_{qp}(i_{qref} - i_q) + k_{qi} \int (i_{qref} - i_q) dt] - \omega L i_d \end{cases} \quad (14)$$

式中: u_d , u_q 分别为网侧电压经dq变换生产的d,q轴电压; i_d , i_q 分别为网侧电流经dq变换生产的d,q轴电流; k_{dp} , k_{di} , k_{qp} , k_{qi} 分别电流内环控制器的

d, q 轴比例、积分系数; L 为连接电抗器的等效电感。

因此,得到整流侧 MMC 控制结构如图 4 所示。通过功率外环和电流内环的双环控制,实现直流电压和网侧交流电压稳定,消除了电动机类设备启动对电压稳定的影响。

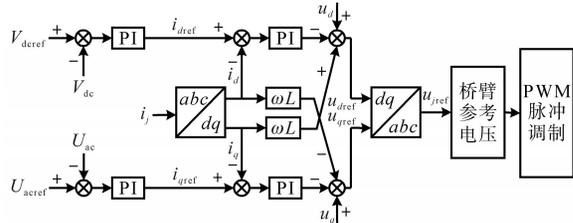


图4 定直流电压控制和定交流电压控制框图

Fig.4 Block diagram of constant DC voltage control and constant AC voltage control

3.3 逆变侧换流器控制策略

在线路末端,主要是电动机类用电设备,系统相当于孤岛运行。为保证用电设备运行电压稳定,对于逆变侧的 MMC 换流器,采用定频率控制和定交流电压控制,其控制结构框图如图 5 所示^[23]。图中, f_0 为交流系统标称频率; D_r, D_{ac} 分别为有功功率、无功功率的下垂系数; P 为有功功率测量值。通过调整有功功率偏差输出使得逆变侧频率跟随交流系统频率,经压控振荡器输出定频率控制下的参考角度 θ^* 。此外,在轨道交通长距离区间,存在大量电动机类负荷,其运行性能与电压密切相关,逆变侧采用定交流电压控制能够维持末端电压稳定,使电动机类负荷能够在额定工况下运行。

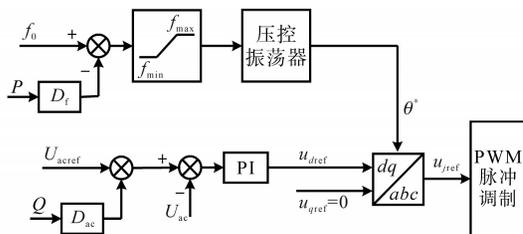


图5 定频率控制和定交流电压控制框图

Fig.5 Block diagram of constant frequency control and constant AC voltage control

4 仿真验证及分析

为验证本文所提方案的有效性,在 PSCAD/EMTDC 软件中搭建如图 2 所示的仿真模型,对电动机类设备启动暂态过程及稳态运行阶段的电压、电流等指标进行分析讨论,评估所提配电方案的效果,并分析该方案的经济性。

4.1 仿真参数

由于轨道交通长距离水泵、风机等电机类负荷通常为三相异步电机^[8],故本文采用两台 15 kW 的三相异步电动机作为用电设备,其额定电压为 380 V、功率因数为 0.9,配电距离设置为 3 km。为了保证容量裕度充足,选取 MMC 额定容量为 100 kV·A,结合上文对 MMC 换流器各参数选取的分析计算,得到 MMC 换流器具体参数为:MMC 额定容量 $S_N=100 \text{ kV}\cdot\text{A}$,交流系统额定频率 $f_0=50 \text{ Hz}$,直流电压 $U_{dc}=750 \text{ V}$,子模块额定电压 $U_c=75 \text{ V}$,每个桥臂子模块数 $N=10$,子模块电容 $C_0=20 \text{ mF}$,桥臂电感 $L_0=0.5 \text{ mH}$ 。

4.2 仿真分析

两台电机采用分时启动方式,第 1 台在 3 s 启动,第 2 台在 6 s 启动,仿真总时长设置为 10 s。按照电动机类设备运行电压偏差 $\pm 5\%$ 的规定,根据常规配电方案交流线路电压降公式(1)计算,至少需采用两根截面型号为 $3\times 240+1\times 120 \text{ mm}^2$ 的电缆双拼才能使用。而对于直流配电方案,根据直流电缆电压降公式(2)计算,至少需选用截面 150 mm^2 的单芯电缆才能满足相应的电压要求,由于逆变器采用定交流电压的控制策略,能够维持末端电压稳定,电压质量有较大提高,因此只需按载流量要求选择电缆截面,故选取截面为 50 mm^2 的单芯电缆。图 6 为常规方案与直流方案输出电压有效值,图中虚线表示常规方案线电压有效值,即交流电缆末端三相电压的有效值;实线表示直流方案,输出电压为三相逆变器交流侧输出电压的有效值,即 PWM 线电压的有效值,并将两种方案关键阶段的数据记录于表 1。

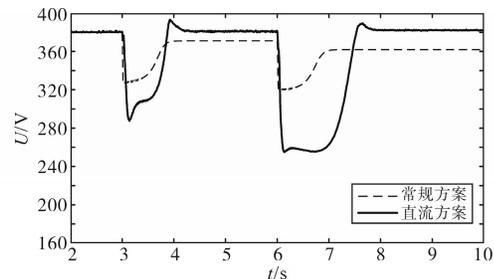


图6 常规方案与直流方案输出电压有效值

Fig.6 Effective value of output line voltage of conventional scheme and DC scheme

由图 6 和表 1 可知,在线路空载时,两种配电方案空载电压均不存在过载现象。采用常规配电方案时,第 1 台电动机和第 2 台电动机启动电压偏差分别为 14.08% 和 15.82%,而采用直流配电方案时电压偏差分别为 25.42% 和 34.47%。直流

表1 各阶段电动机机端电压数据

Tab.1 Terminal voltage data of motor at each stage

项目	常规方案 电压/V	电压 偏差/%	直流方案 电压/V	电压 偏差/%
空载电压	380	0	380	0
第1台启动时	326.5	14.08	283.4	25.42
第1台运行时	371.1	2.34	380	0
第2台启动时	319.9	15.82	249	34.47
第2台运行时	362	4.74	380	0

配电方案启动电压暂降远大于常规方案,主要是由于直流配电方案采用了截面较小的电缆,其阻抗较大,在电机启动时电流较大,从而导致线路上的压降较大,故在启动阶段直流配电方案电压降落大于常规配电方案。为了满足电动机启动要求,应保证接触器线圈的电压不低于释放电压。在工程上,接触器线圈的释放电压一般为额定电压的70%~80%,如有特殊要求,在保证电动机启动转矩下,可选择特殊的宽电压接触器,如施耐德 TeSys D Green 系列,接触器线圈电压范围为100~250V。直流配电方案启动电压降较大,故选用此系列的接触器,即可满足工程要求。

在电动机稳态运行时,常规配电方案两台电动机稳态运行电压偏差分别为2.34%和4.74%。直流配电方案下,由于逆变侧换流器采用了定交流电压控制,其稳态运行电压偏差为0,电压质量有了较大的提升,用电设备在额定工况下使用可发挥其最佳的动态性能。

为了减小电动机启动时冲击电流对系统中其它设备的影响,有必要分析电动机设备同时启动和分时启动两种方式下的启动电流,以确定合理的启动方式。直流配电方案的两种启动方式下电流波形如图7所示。

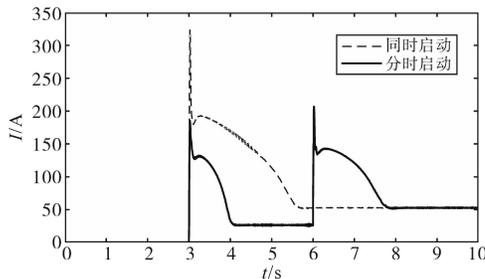


图7 电动机电流大小
Fig.7 Motor current size

两台电机同时启动的暂态电流最高可达324.2A,若采用分时启动的方式,启动过程中的暂态电流最大值为206.8A,明显低于同时启动的电流值。轨道交通配电系统中若存在多台用电设备需同时运行,采用分时启动可明显减小启动

电流,减弱电动机类等用电设备启动时大电流对电网的冲击,以保证其它用电设备的正常运行。

进一步,对常规配电方案和直流配电方案的经济性进行分析,用电设备仍以上述两台电机为例,考虑不同配电距离,常规方案根据式(1)计算三相线路每1A·km的电压损失百分数,进而确定所需电缆截面大小;直流方案电缆截面按载流量进行选取,当负荷大小不变时,其所需电缆截面不变。根据市场调研,每台换流装置价格约为20万元,所需电缆型号均为WDZN-YJY-0.6/1kV,其不同截面的价格如表2所示。

表2 WDZN-YJY-0.6/1kV型电缆单价

Tab.2 WDZN-YJY-0.6/1kV cable unit price

电缆截面/mm ²	价格/(元·m ⁻¹)	电缆截面/mm ²	价格/(元·m ⁻¹)
1×50	50	3×150+1×70	410
3×50+1×25	138	3×185+1×95	510
3×120+1×70	336	3×240+1×120	670

在此基础上,分析计算不同配电距离下两种配电方案的造价,得到两种方案所需电缆截面大小和造价如表3所示。根据表3造价估算的结果,得到两种配电方案在不同配电距离下的工程造价如图8所示。

表3 不同配电距离下两种方案所需电缆截面及造价

Tab.3 Cable cross-section and construction cost required for the two schemes under different distribution distances

配电距离/km	电缆截面/mm ²		造价/万元	
	直流方案	常规方案	直流方案	常规方案
0.5	50	50	90	13.8
1.0	50	120	100	67.2
1.5	50	185	110	153
2.0	50	240	120	268
2.5	50	150双拼	130	410
3.0	50	240双拼	140	804

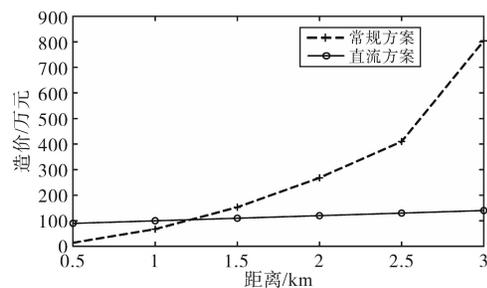


图8 两种配电方案工程造价比较
Fig.8 Comparison of engineering costs of two power distribution schemes

由图8可知,本文算例中常规配电方案工程造价达804万元,而直流配电方案仅需140万元,其经济性优势较为明显。当配电距离小于1.25km

时,常规配电方案造价小于直流配电方案造价;当配电距离大于1.25 km时,常规配电方案造价超过直流配电方案。随着配电距离的增加,常规配电方案所需电缆截面较大,导致工程造价大幅度增加,而直流配电方案工程造价小幅增长,故在较长距离配电时更能凸显直流配电方案的经济性。此外,对于系统不同的负荷功率,直流配电方案和常规配电方案造价的等值点有所不同,本文仿真算例中负荷功率为30 kW,两种配电方案造价相等的配电距离为1.25 km,当负荷功率大于30 kW时,其电气距离缩短,小于1.25 km;负荷功率小于30 kW时,其造价等值点大于1.25 km。因此,在实际工程设计时,应进行工程造价核算,以决定用电设备的配电方案。

5 结论

本文全面分析了低压直流配用电技术在轨道交通长距离配用电场景的应用,研究结果表明,低压直流配用电具有较强的技术经济优势。首先,结合轨道交通长距离配用电场景的特点,对直流配用电技术的电压等级选择、供电容量、拓扑结构设计进行了深入分析比较。其次,对适用于轨道交通长距离配用电场景的换流器关键参数进行分析设计,在此基础上,提出了电压协调控制策略,显著提升了用电设备的运行效果。最后,基于PSCAD/EMTDC仿真软件验证了所提直流配电方案及电压控制策略的有效性,此外,考虑用电设备的不同配电距离,将常规配电方案与直流配电方案的工程造价进行比较,表明了直流配电方案经济性优势明显,低压直流配电技术在轨道交通长距离配用电领域具有良好的工程应用前景。

参考文献

[1] 王学贵. 基于都市圈融合发展理念的成都市域快线13号线互联互通方案研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(4): 6-13.
WANG Xuegui. Research on the connectivity scheme of Chengdu city express line 13 based on the concept of integrated urban development[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(4): 6-13.

[2] 吕昌明. 穿越中心城区市域快速轨道交通技术标准研究——以成都市轨道交通13号线为例[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(5): 32-38.
LÜ Changming. Study on technical standard of regional rapid rail transit through central urban district—case study of Chengdu rail transit 13[J]. Railway Standard Design, 2022, 66

(5): 32-38.

[3] 王哲. 地铁工程远距离设备配电设计探讨[J]. 智能建筑电气技术, 2019, 13(6): 73-76.
WANG Zhe. Discussion on distribution design of long distance equipments in metro engineering[J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2019, 13(6): 73-76.

[4] 王路波. 低压三相电动机远距离配电问题探讨[J]. 电气应用, 2014, 33(2): 22-24.
WANG Lubo. Discussion on long-distance power distribution of low-voltage three-phase motors[J]. Electrical Application, 2014, 33(2): 22-24.

[5] 潘元欣. 地铁区间较远距离电机起动方式比较[J]. 铁道标准设计, 2009(7): 98-100.
PAN Yuanxin. Comparison for different starting modes of motors at metro sections with long distance[J]. Railway Standard Design, 2009(7): 98-100.

[6] 魏澈, 李强, 洪毅, 等. 流花16-2油田电潜泵长距离供电系统仿真分析[J]. 中国海上油气, 2018, 30(4): 190-195.
WEI Che, LI Qiang, HONG Yi, et al. Simulation and analysis of the long-distance power supply system for electric submersible pumps of LH16-2 oilfield[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(4): 190-195.

[7] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.

[8] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D, et al. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.

[9] 李珊珊, 李丽兰, 朱云霞. 基于双闭环控制的柔性直流输电变流器仿真研究[J]. 电气传动, 2017, 47(9): 19-23.
LI Shanshan, LI Lilan, ZHU Yunxia. Simulation study of VSC-HVDC converter based on double closed-loop control[J]. Electric Drive, 2017, 47(9): 19-23.

[10] 李振, 盛万兴, 段青, 等. 背靠背低压直流配电装备及其直流电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6873-6881.
LI Zhen, SHENG Wanxing, DUAN Qing, et al. Back to back LVDC distribution equipment and DC voltage control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6873-6881.

[11] 李雨桐, 郝斌, 赵宇明, 等. 低压直流配用电技术在净零能耗建筑中的应用探索[J]. 广东电力, 2020, 33(12): 49-55.
LI Yutong, HAO Bin, ZHAO Yuming, et al. Application of low voltage DC power distribution technology in net-zero energy consumption buildings[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(12): 49-55.

[12] 李叶茂, 李雨桐, 郝斌, 等. 低碳发展背景下的建筑“光储直柔”配用电系统关键技术分析[J]. 供用电, 2021, 38(1): 32-38.
LI Yemao, LI Yutong, HAO Bin, et al. Key technologies of

- building power supply and distribution system towards carbon neutral development[J]. *Distribution & Utilization*, 2021, 38(1): 32-38.
- [13] 杨加成. 低压直流配用电系统控制保护特性分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
YANG Jiacheng. Analysis of low voltage DC power supply system's control and protection characteristics[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [14] 孟祥坤, 李路畅, 袁栋, 等. 考虑单极转供的直流配用电系统安全性分析[J]. *电网技术*, 2022, 46(8): 3132-3139.
MENG Xiangkun, LI Luchang, YUAN Dong, et al. Safety analysis of DC distribution system considering monopole transfer[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(8): 3132-3139.
- [15] 苏麟, 朱鹏飞, 闫安心, 等. 苏州中压直流配电工程设计方案及仿真验证[J]. *中国电力*, 2021, 54(1): 78-88.
SU Lin, ZHU Pengfei, YAN Anxin, et al. Design scheme and simulation verification of suzhou medium voltage DC distribution project[J]. *Electric Power*, 2021, 54(1): 78-88.
- [16] 熊雄, 季宇, 李蕊, 等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(23): 6802-6813.
XIONG Xiong, JI Yu, LI Rui, et al. An overview of key technology and demonstration application of DC distribution and consumption system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(23): 6802-6813.
- [17] BOROYEVICH D, CVETKOVIĆ I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems—a contemplative view[C]// *Proceedings of the 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Brasov, Romania: IEEE*, 2010: 1369-1380.
- [18] 中国航空规划设计研究总院有限公司. 工业与民用供配电设计手册[M]. 第四版. 北京: 中国电力出版社, 2016.
China Aviation Planning and Design Research Institute(Group) Co., Ltd.. Industrial and civil power supply and distribution design manual[M]. Fourth Edition. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [19] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 中低压直流配电压导则: GB/T 35727—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Systems Aspects for Electrical Energy Supply. Guidelines for standard voltage of medium and low voltage DC distribution system: GB/T 35727—2017[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [20] 王建渊, 贾灵贤, 蒋琪, 等. 低压直流配电网电压等级序列的经济性研讨[J]. *电气传动*, 2021, 51(18): 65-69, 75.
WANG Jianyuan, JIA Lingxian, JIANG Qi, et al. Economic study on voltage grade sequence of low voltage DC distribution network[J]. *Electric Drive*, 2021, 51(18): 65-69, 75.
- [21] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
XU Zheng. Flexible DC transmission system[M]. 2nd Edition. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [22] 刘亚昕. 3 kV/60 kW 模块化多电平换流器的研制[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
LIU Yaxin. Equipment development of 3 kV/60 kW modular multilevel converter[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [23] 张弛, 曾杰, 曾嵘, 等. 直流孤岛微电网的两级功率协同控制方法[J]. *电气传动*, 2019, 49(12): 58-63.
ZHANG Chi, ZENG Jie, ZENG Rong, et al. A two stage cooperative power control method for islanded DC microgrid[J]. *Electric Drive*, 2019, 49(12): 58-63.

收稿日期: 2022-08-23

修改稿日期: 2022-09-03