

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.08.035

一种紧凑型移动箱变车的研制

文正其, 张伟, 张雷, 叶华伟, 杜玮
(国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430000)

摘要: 为提高配网供电可靠性,实现线路检修、配变更换等实施带电作业,减少停电时间和次数,电力企业积极开展配电网带电作业技术和装备研究。文中从电气计算、设备选择、结构优化等方面论述了一种紧凑型移动箱变车设计方案,使10 kV移动箱变车具备“安全可靠、结构紧凑、使用便捷”的特点,可方便应用于旁路作业和负荷转供。

关键词: 移动箱变车;旁路作业;负荷转供

Development of a Compact Mobile Transformer Vehicle

WEN Zhengqi, ZHANG Wei, ZHANG Lei, YE Huawei, DU Wei

(Wuhan Nari Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430000, China)

Abstract: To improve the power supply reliability of distribution grid, achieve live working for line maintenance and distribution transformer replacement etc., and reduce outage time and number, a design scheme of 10 kV compact mobile transformer vehicle is discussed in terms of electrical calculation, equipment selection, and structural optimization. This mobile transformer vehicle can be applied to bypass operation and load transfer with safe and reliable characteristics, compact structure and convenience.

Key words: mobile transformer vehicle; bypass operation; load transfer

0 引言

随着用户对供电可靠性要求的提高,电力公司在配电领域积极推广不停电作业技术和负荷转供技术,并研制出旁路作业车和移动箱变车,助力配网检修方式升级换代^[1-3]。旁路作业车主要用于旁路检修作业^[1,4-5],而移动箱变车兼具旁路和负荷转供双重功能,一方面利用旁路功能实现架空线路、环网柜、分支箱、电缆线路故障状态下的不停电检修,另一方面利用负荷转供功能为制茶、烤烟等季节性用电负荷提供临时增容电源等^[6]。目前的移动箱变车一般采用负荷开关柜不带全套保护功能,当移动箱变车现场使用时若旁路电缆或变压器等出现接地、短路故障时容易引起上级电源开关跳闸,扩大

停电范围^[7]。文中依照“安全可靠、结构紧凑、使用便捷”的设计原则,通过短路校验合理选用带断路器的环网柜和低压柜等电气主设备,利用整定计算优化保护配置,最大程度地实现箱变车侧故障和主配电网故障隔离,保证原配电网的安全。在车厢内外结构设计上,除实现设备空间合理布局及保障车辆稳定性外,并利用通风校核计算,满足变压器等散热要求,保证变压器使用的绝缘寿命年限。

1 电气设计

在移动箱变车技术规范中,将其分为基本型和扩展型,扩展型在基本型的基础上增加环网柜、低压卷缆盘及高低压保护等设备及功能^[8]。为了满足移动箱变车功能多样性和使用的便捷性,文中在扩

展型的基础上进行移动箱变车优化设计和设备选型,电气主接线见图1。配电变压器容量为630 kVA,高压侧采用一进两出环网柜,进线为接入10 kV电源,一回出线为变压器馈线接变压器10 kV侧,

一回出线为馈线柜,用于负荷转供或旁路。低压侧为两回出线(一主一备,采用均为1 000 A的低压断路器)。

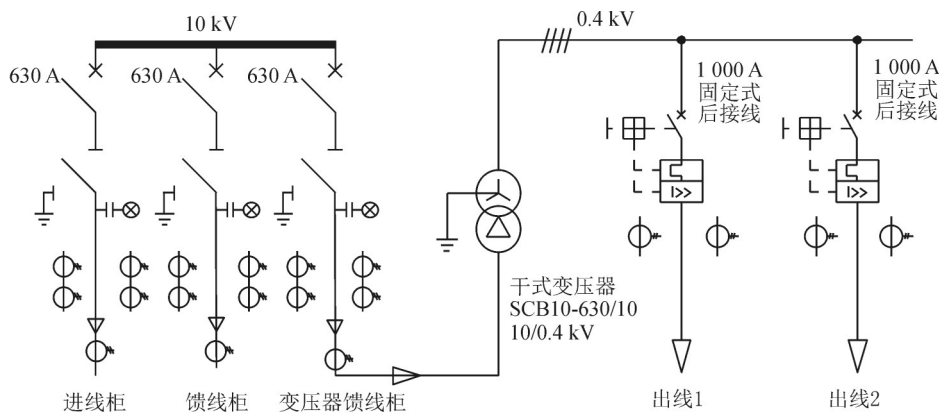


图1 电气主接线图

Fig. 1 Electrical main wiring diagram

2 设备选择

2.1 配电变压器

干式变压器具备安装调试方便,无需吊罩检查,高、低压进出线端子可直接与高、低压开关柜连接,和防火防爆等优点^[9],因此相比油浸式配电变压器,更适合于安装在空间有限、运维检修不方便的移动箱变车上,文中选择型号为SCB10-630/10、阻抗电压为6%的干式配电变压器,具体参数见表1。由于配电变压器运行在一个相对封闭的箱体空间内,为保证变压器运行温升满足要求,配备带温控及温显装置,温度传感器置于每相低压线圈中,实时监控变压器三相线圈的运行温度和铁心温度,输出高温报警及超温跳闸信号,并按温度的变化自动开停箱体轴流风机,提高散热效率。

表1 配电变压器参数

Table 1 Distribution transformer parameters

参数	数值	参数	数值
型号	SCB10	导体材质	铜
电压等级	10±2×2.5%/0.4	容量/kVA	630
联接组别	Dyn11	阻抗电压/%	6
空载损耗/kW	1.3	负载损耗/kW	5.96
调压方式	无励磁调压	冷却方式	AN/AF

2.2 10 kV 环网柜

文中环网柜的选择主要基于以下几点:①车辆尺寸的限制。按国标要求厢式货车宽度≤2.5 m,因此环网柜宜选择体积更小的SF₆充气柜^[10-11],同时需

具备车辆长途运输抗震能力,防气体泄漏;②移动箱变车往往用于临时供电、旁路作业等场合,现场运行工况更为复杂,相比较常规箱变主开关动作更为频繁;③为接入电网安全,实现移动箱变车端故障就地隔离,防止上一级电源端跳闸扩大停电面积等。因此选择SF₆气体绝缘真空断路器环网柜,具体型号选择计算过程如下:

1)额定电流选择。高压电器额定电流 I_N 不应小于该回路的最大持续工作电流 $I_{max}^{[12]}$,变压器馈线柜最大持续工作电流(变压器高压侧额定电流 I_N) $I_N = 34.6$ A,而目前市面上环网柜最小的额定电流为630 A,故选择额定电流为630 A的环网柜,同时也能满足变压器过负荷要求。

2)动稳定校验。依据设备安装处的短路电流峰值不应大于给定的额定电流峰值耐受电流进行校验,即

$$i_{ch} \leq I_p \quad (1)$$

式(1)中: i_{ch} 为三相短路冲击电流(三相短路峰值电流),kA; I_p 为高压电器或开关设备的额定峰值耐受电流,kA。

对移动箱变车来说,因其使用地点的不确定性,一般难以知道上级电源的容量及两者距离,工程上假设近距离短路容量按300 MVA考虑或远距离按200 MVA考虑,所计算的结果可作为选定设备的依据^[13]。

按短路容量 $S_c=300$ MVA计算,则短路电流 $I_k=16.5$ kA,短路冲击电流计算见式(2)

$$i_{ch} = K_{ch} \sqrt{2} I_k \quad (2)$$

式(2)中, K_{ch} 为冲击系数, 工程设计中取值原则为: ①当短路发生在单机容量为 12 000 kW 及以上的发电机端时, 取 $K_{ch}=1.9$; ②当短路点远离发电厂, 总电抗较大时, 取 $K_{ch}=1.8$ 。

文中 K_{ch} 取 1.8, 冲击电流为 $i_{ch}=42$ kA, 因此选择额定电流为 630 A, 断路器额定电流峰值耐受电流 50 kA 的环网柜满足技术要求。

3) 环网柜保护配置。环网柜保护配置的目的是保护配电变压器以及将移动箱变车故障与原配网隔离, 避免故障扩大, 主要配置速断保护和过流保护, 前者主要用来是保护旁路、变压器高压侧线路及变压器内部故障, 后者作为变压器过负荷保护和低压侧短路的后备保护。

高压侧电流速断保护, 保护动作电流按躲避变压器外部故障的最大短路电流来整定, 即

$$I_{dz} = K_k \cdot I_{d \cdot \max}^{(3)} \quad (3)$$

式(3)中: K_k 为可靠系数, 取 1.3; $I_{d \cdot \max}^{(3)}$ 为变压器低压侧母线发生三相短路时, 流过保护装置的最大短路电流。同时, 电流速断保护的動作电流还应躲避空载投入变压器时的励磁涌流。

查阅文[14], 配电变压器低压侧三相短路电流 $I_{d \cdot \max}^{(3)} = 15.11$ kA, 折算到高压侧 $I_{d \cdot \max}^{(3)} = 576$ A, 则按照式(3)速断动作整定值 $I_{dz} = 748$ A。

如果考虑变压器合闸励磁涌流, 按照变压器额定电流的 8 倍考虑, 即为: $34.6 \times 8 = 276.8$ A, 小于变压器低压侧三相短路电流时高压侧电流, 能够有效避开空载投入变压器时的励磁涌流。

过流保护是保护变压器低压出口短路, 要求躲过变压器正常的短时过电流(非过负荷电流), 整定值为额定电流乘以过负荷系数及可靠系数, 除以继电器的返回系数, 即

$$I_{dz} = K_{rel} K_{jx} \frac{K_{gh} I_{ln}}{K_r} \quad (4)$$

式(4)中: K_{rel} 为可靠系数, 用于过流保护时 GL 型继电器取 1.3; K_{jx} 为接线系数, 接于相电流时取 1, 接于相电流差时取 1.732; K_{gh} 为过负荷系数, 包括电动机自起动引起的过流倍数, 一般取 2~3, 当无自起动电动机时取 1.3~1.5; K_r 为继电器返回系数, 取 0.85; I_{ln} 为高压侧额定电流。

根据式(4), 过流保护整定值 $I_{dz} = 79.4$ A。文中的整定值均为电流的实际值, 具体整定时应考虑电流互感器的变比。

2.3 低压柜

低压断路器的选择依据为:

1) 低压断路器额定电流不应小于该回路的最大持续工作电流。630 kVA 配电变压器低压侧额定电流为 909.4 A, 同时在低压配电系统中, 变压器低压侧进线断路器、母联断路器、800 A 及以上的馈出线断路器一般选用框架断路器, 因此文中低压侧进线断路器选择 1 000 A 框架式断路器。

2) 按短路电流校验低压断路器的分断能力, 断路器极限分断能力 $\geq$ 电路最大短路电流, 即

$$I_{cu} \geq I_{k \max} \quad (5)$$

式(5)中: I_{cu} 为额定极限短路分断能力; $I_{k \max}$ 为线路最大短路电流, 一般取三相短路电流 $I_{d \cdot \max}^{(3)}$ 。基于文[14], 配电变压器低压侧三相短路电流 $I_{d \cdot \max}^{(3)} = 15.11$ kA, $i_{ch} = 38.5$ kA。如 ABB SACE HF 系列空气断路器 HF2 N 1000 PR331/P-HF-LI HR 3P, 其额定极限短路分断能力 $I_{cu} = 50$ kA, 额定运行短路分断能力 $I_{cs} = 50$ kA 均满足要求。

3) 保护配置, 包括长延时、短延时和瞬时保护, 低压进线断路器整定及计算见表 2。

表 2 低压进线断路器整定计算表

Table 2 Low-voltage breaker setting calculation

参数	数值
变压器额定容量 S_e /kVA	630
变压器低压侧额定电流 I/A	909
长延时整定电流 ($I_{set1} = 1.1 I_r$)/A	1 000
短延时整定电流 ($I_{set2} = 4 I_r$)/A	3 636
瞬时整定电流 ($I_{set3} \geq 10 I_{set1}$)/A	9 090

2.4 高低压电缆及附件

为方便高低压电缆安放在电缆绞盘上和移动使用, 10 kV 旁路电缆和引下电缆采用柔性电缆 EPR8.7/151×70 mm², 单芯铜导体, 其载流量为 305 A, 满足高压侧额定电流的要求。

依据变压器低压侧额定电流为 909 A, 低压电力输出选用载流量为 500 A 重型橡套软电缆 YCW 1*150mm² 进行并联。在满足高低压柔性电缆的载流量要求的情况下, 进一步检验电缆热稳定性^[15-17], 电缆热稳定性校验公式见式(6)

$$S_{\min} = \frac{\sqrt{Q_t}}{C} \times 10^2 = \frac{I_t \sqrt{t}}{C} \times 10^2 \quad (6)$$

式(6)中, $S_{\min}$ 为电缆满足热稳定性所需的最小截面积, mm^2 ; Q_1 为短路电流产生的热效应, $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$; C 为热稳定系数, 按照文[18]式 E1.1-2 计算; I_1 为短路电流周期分量有效值, A ; t 为短路切除时间, s ; 校验短路热稳定所用的时间 $t = t_b + t_{\text{fd}}$, 其中 t_b , t_{fd} 分别为主保护动作时间和断路器开断时间, s 。

以高压侧为例, 主保护为速动保护, 主保护动作时间近似为 0 s, 按表 3 短路电流持续时间取 0.2, 计算电缆稳定系数为 12 156, 则电缆最小截面积 $S_{\min} = 60.7 \text{ mm}^2$, 故高压侧选择 70 mm^2 的电缆满足热稳定要求。

表 3 热稳定的短路电流持续时间

Table 3 Duration of the heat stabilized against short-circuit current

开断速度	开断时间 t_{fd} / s	短路电流最小持续时间 $t_{\min} / \text{s}$
高速	<0.08	0.10
中速	0.08~0.12	0.15
低速	>0.12	0.20

另外, 该方案中电缆采用旁路电缆自锁定快速插拔式终端、中间接头、绝缘引线线夹等方式连接, 提供现场安装速度和提高可靠性^[19]。

3 结构设计

移动箱变车的结构设计按照“安全、紧凑、可靠”的原则进行设计, 整个厢体空间布局分为 4 个部分, 即休息室、变压器室、开关室和电缆绞盘室, 布局见图 2(a)。电缆进出线通过车辆底盘下部从厢体侧面出线, 采用快速拔插头型式和旁路或低压电缆输出电缆连接, 见图 2(b)。

变压器运行损耗加热厢体空气, 热空气上升与进出风百叶窗构成流动气流通道, 进出风百叶窗的高差越大, 空气流动速度越高, 通风效果越好。按照文[15], 变压器室内通风窗有效面积计算式见式(7)

$$F_j = F_c = 4.25P \sqrt{\frac{\varepsilon}{h\Delta t^3}} \quad (7)$$

式(7)中: F_j 为进风口有效面积, m^2 ; F_c 为出风口有效面积, m^2 ; P 为变压器的全部损耗, kW ; ε 为进风口和出风口局部阻力之和, 一般取 5; h 为进风口和出风口中心高差, m ; Δt 为进风口和出风口空气的温差, $^{\circ}\text{C}$, 其值不大于 15°C 。

其次进出风窗口的实际面积应为有效面积乘以不同的构造系数 K , 金属百叶窗 $K=1.2$, 网孔为

$10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 铁丝网, $K=1.2$ 。

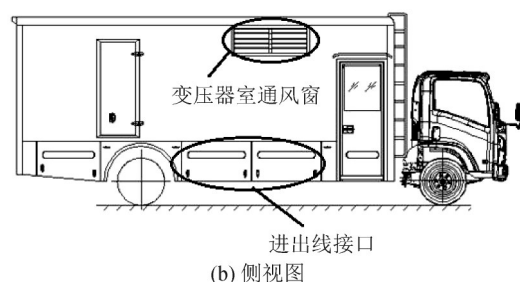
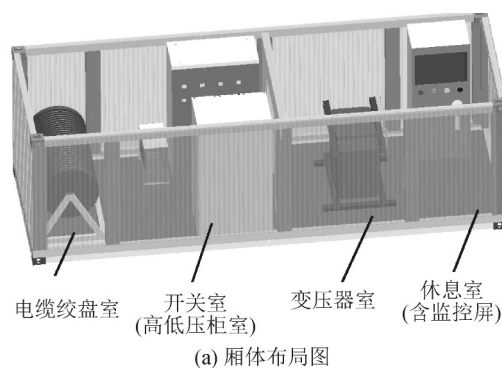


图 2 移动箱变车结构图

Fig. 2 Mobile transformer vehicle structure

按照该方案选择的干式变压器, 散热面积 $F_j = F_c = 0.84 \text{ m}^2$, 实际进出风口实际面积应为 $1.2 F_j = 1 \text{ m}^2$ 。为提高散热效率, 可增加轴流风机, 并适当减少散热窗面积。

4 结语

文中提出了一种紧凑型移动箱变车的设计方案, 通过电气计算选择环网柜、低压柜、电缆等主设备, 并对电气设备进行了短路稳定性校验。考虑到移动箱变车故障对原配电网的风险, 方案采用断路器柜实现箱变车侧故障隔离, 避免故障范围扩大。在结构设计方面按照“安全、紧凑、可靠”的原则进行了设计, 实现厢体空间优化利用, 并校验了变压器室通风条件, 保障箱变车良好的通风环境。

参考文献:

- [1] 刘夏清, 牛捷, 李金亮, 等. 10 kV 配网小型旁路系统作业方法研究[J]. 机电工程, 2016, 33(4): 493-497.
LIU Xiaqing, NIU Jie, LI Jinliang, et al. Research on small bypass system operation method in 10 kV distribution network[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2016, 33(4): 493-497.
- [2] 罗俊华, 蓝剑, 苏勇, 等. 15 kV 柔性旁路电缆的不停电抢修作业技术[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 949-953.
LUO Junhua, LAN Jian, SU Yong, et al. Bypass technique of living-work on-site with 15 kV flexible power cable for

- power urgent repaired[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4):949-953.
- [3] 欧相林, 邓鹤鸣, 王力农, 等. 10 kV 配电线路带电作业安全综合评价应用分析[J]. 高压电器, 2013, 49(2):55-60.
OU Xianglin, DENG Heming, WANG Linong, et al. Application of synthetical safety evaluation in the live working on 10 kV distribution line[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2):55-60.
- [4] 10 kV 旁路作业设备技术条件: Q/GDW 249—2009[S]. 2007. Technical specification of equipment for 10 kV bypass working: Q/GDW 249—2009[S]. 2007.
- [5] 王 阳, 倪志坚, 张新宇, 等. 配网旁路带电更换变压器作业方法探讨[J]. 东北电力技术, 2016, 37(9):56-59.
WANG Yang, NI Zhijian, ZHANG Xinyu, et al. Discussion on working method for live replacing transformer of distribution network bypass[J]. Northeast Electric Power Technology, 2016, 37(9):56-59.
- [6] 胡德敏, 万 苏, 王 衡. 移动箱变车在配网快速抢修中的应用探索[J]. 中国科技信息, 2016(17):55-56.
HU Demin, WAN Su, WANG Heng. Application of mobile transformer vehicle in fast repair of distribution grid[J]. China Science and Technology Information, 2016(17):55-56.
- [7] 杨晓翔. 旁路负荷转移车电气接线方案探讨[J]. 电气应用, 2013, 32(1):42-45.
YANG Xiaoxiang. Discussion on electrical wiring scheme of bypass load transfer vehicle[J]. Electrotechnical Application, 2013, 32(1):42-45.
- [8] 移动箱变车技术规范: Q/GDW 11239—2014[S]. 2014. Technical specification of the mobile transformer vehicle: Q/GDW 11239—2014[S]. 2014.
- [9] 姜宏伟, 徐其迎, 游华春. 干式变压器温升理论与计算方法研究[J]. 变压器, 2016, 53(1):14-18.
JIANG Hongwei, XU Qiyang, YOU Huachun. Study on temperature rise theory and calculation method of dry-type transformer[J]. Transformer, 2016, 53(1):14-18.
- [10] 王金方, 王万亭, 朱 波. 双电源自动投切环网柜的研制与工程应用[J]. 高压电器, 2017, 53(7):199-204.
WANG Jinfang, WANG Wanting, ZHU Bo. Research and application of a dual power automatic switching ring main unit[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(7):199-204.
- [11] 黎 斌, 王日新, 王 君, 等. 对中压配电柜各种主绝缘的思考——兼评抽出式紧凑型空气绝缘环网柜的特点[J]. 高压电器, 2016, 52(8):7-13.
LI Bin, WANG Rixin, WANG Jun, et al. Thoughts on various kinds of main insulation of medium voltage distribution cabinet - comment on the characteristics of withdrawable compact air-insulated RMU[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8):7-13.
- [12] 高压/低压预装箱式变电站选用导则: DL/T 537—2002[S]. 2002.
High-voltage/low-voltage prefabricated cubical substation: DL/T 537—2002[S]. 2002.
- [13] 程开嘉, 刘冬梅. 10 kV 用户端变配电所的设计[J]. 电气应用, 2013, 32(2):24-25.
CHENG Kaijia, LIU Dongmei. Design of 10 kV client-side power distribution[J]. Electrotechnical Application, 2013, 32(2):24-25.
- [14] 中国航空规划设计研究总院有限公司. 工业与民用配电设计手册[M]. 第四册. 北京: 中国电力出版社, 2016.
China Aviation Planning and Design Institute(Group)Co., Ltd.. Industrial and civil distribution design manual[M]. Volume 4. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [15] 戴瑜兴, 黄铁兵, 梁志超. 民用建筑电气设计手册[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
DAI Yuxing, HUANG Tiebing, LIANG Zhichao. Civil building electrical design manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2007.
- [16] 方雅君. 变压器低压侧出线电缆热稳定校验[J]. 福建建设科技, 2013(5):72-73.
FANG Yajun. The transformer low-voltage outlet check the cable thermal stability[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2013(5):72-73.
- [17] 程晓晓, 马建伟, 尹轶珂, 等. 高压 XLPE 绝缘电力电缆短时过载电流极限研究[J]. 高压电器, 2017, 53(4):150-155.
CHENG Xiaoxiao, MA Jianwei, YIN Yike, et al. Research on short-time overload current limit for high voltage XLPE power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4):150-155.
- [18] 电力工程电缆设计规范: GB 50217—2007[S]. 2007. Code for design of cables of electric engineering: GB 50217—2007[S]. 2007.
- [19] 田 鑫, 史善哲, 李士林, 等. 船舶与岸电快速连接技术现状[J]. 湖南电力, 2016, 36(3):36-38.
TIAN Xin, SHI Shanzhe, LI Shilin, et al. Technical present situation of quick - connect alternative marine electrical power system[J]. Hunan Electric Power, 2016, 36(3):36-38.
- 文正其(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为智能配电网和输变电设备状态检修技术等。
- 张 伟(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为移动式、预装式变电站技术等。
- 张 雷(1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为移动式、预装式变电站技术等。
- 叶华伟(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为移动式、预装式变电站技术等。
- 杜 玮(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为智能电气装备、智能变电站技术等。