

变压器分列运行下多断路器联锁方案研究

黄院芳¹, 葛 雯², 武文星¹, 龙庆文¹

(1. 广东交通职业技术学院轨道交通学院, 广东 广州 510650;

2. 广州市电力工程设计院有限公司, 广东 广州 510240)

摘要: 变压器分列运行时, 进线断路器与联络断路器间须加装可靠的联锁装置, 避免运维人员转供电时误合断路器, 导致发生电气事故和人身安全事故。以 2 ~ 3 台变压器分列运行的低压配电系统为例, 分析有人值守和无人值守时断路器的联锁方案; 根据 5 台变压器分列运行系统的 9 台断路器电气联锁方案规律, 提出多断路器电气联锁控制式模型。

关键词: 框架式断路器; 电气联锁; 机械联锁; 电气联锁控制式模型

Research on interlocking scheme of multiple circuit breakers under separate operation of transformers

HUANG Yuanfang¹, GE Wen², WU Wenxing¹, LONG Qingwen¹

(1. Guangdong Communication Polytechnic School of Rail Transit, Guangzhou 510650, China; 2. Guangzhou Electric Power Engineering Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510650, China;

Abstract: When the transformers are operated separately, a reliable interlock device should be installed between the incoming line circuit breaker and the tie circuit breaker to avoid electrical accidents and personal safety accidents caused by the operation and maintenance personnel mistakenly closing the circuit breaker when switching power supply. The low-voltage distribution system with 2~3 transformers operating in sequence is taken as an example, the interlocking scheme of circuit breaker in case of manned and unattended is analyzed. According to the rules of electrical interlocking scheme of 9 circuit breakers of 5 transformers operating system, the electrical interlocking control model of multiple circuit breakers is proposed.

Key words: frame type circuit breaker; electrical interlocking; mechanical interlocking; electrical interlock control model

0 引言

单台变压器供电的低压配电系统, 当低压电源失电或进线开关故障检修时, 即使用户自备发电机组等备用电源, 也因其容量有限, 造成非重要负荷停电, 供电可靠性较低。因此大容量用户常采用多变压器供电方式, 各变压器共同向所有负荷供电, 或各自向部分负荷供电, 变压器间互

为备用。当电源失电或进线开关故障检修时, 系统原有负荷仍能获得电源。

多变压器供电的低压配电系统, 可分为并列运行和分列运行两种方式。变压器并列运行须满足电压比相等、联结组别相同、短路电压相同以及容量比不超过 3 : 1 等条件^[1]; 变压器分列运行时进线断路器和联络断路器间须加装可靠的机械

轨道交通牵引再生制动能量吸收控制算法的研究与实现 (ZC-B-07-01KY-20007); 基于互联网平台的智慧电瓶车充电系统研究与实现 (ZMT-A-16-22-7901)

电气联锁装置, 否则可能导致发生严重的电气事故和人身安全事故。

1 低压配电系统的运行方式

1.1 变压器并列运行方式

变压器并列运行, 指多台变压器向一段母线供电, 或出线侧一次母线并列运行, 如图1所示。I段0.4 kV母线和II段0.4 kV母线间设置联络断路器 QA_2 , 正常运行时 $QA_1 \sim QA_3$ 为合闸状态, 两变压器均为主用, 共同承担I段和II段0.4 kV母线负荷用电。变压器并列运行方式下, 负荷较低时可停运部分变压器, 减少能量损耗^[2]; 当其中一台变压器检修或退出运行时, 仍能通过其他变压器继续向原有负荷供电。

变压器参数不满足并列运行条件时, 空载运行将产生环流, 严重时将导致变压器烧毁^[3]。并列运行的变压器数量越多, 短路电流就越大, 容易导致断路器跳闸, 影响供电可靠性, 同时变压器并列运行不利于电气事故隔断。

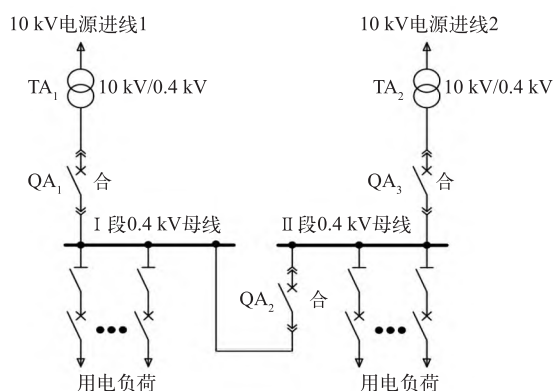


图1 两台变压器并列运行的低压配电系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of low-voltage distribution system with two transformers operating in parallel

1.2 变压器分列运行方式

变压器分列运行, 指变压器出线侧一次母线分列运行, 如图2所示。I段0.4 kV母线和II段0.4 kV母线间设置联络断路器 QA_2 , 正常运行时 QA_1 、 QA_3 为合闸状态, QA_2 为分闸状态, 两变压器互为备用, 各自承担对应母线负荷用电。若I段或II段0.4 kV母线无电时, 可通过合上联络

断路器 QA_2 进行转供电。

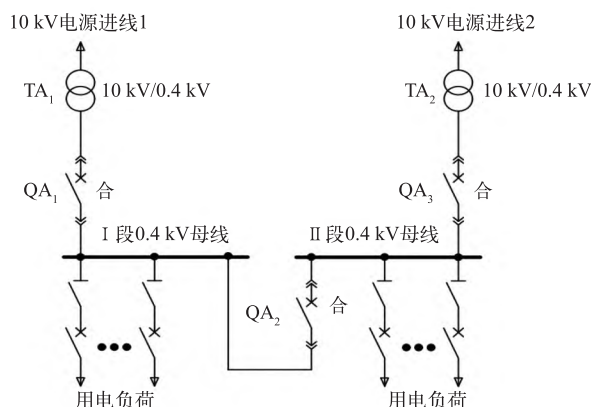


图2 2台变压器分列运行的低压配电系统简图

Fig. 2 Low-voltage power distribution system diagram of two transformers operating separately

变压器分列运行方式兼具并列运行方式的优点, 且供电可靠性较高, 因此大容量专用变压器用户或公用变压器用户多采用多变压器分列运行方式。

2 基于框架式断路器的低压配电系统联锁方案

框架式断路器作为0.4 kV低压配电系统的主要开关元件, 其主要作用是接通、承载和分断正常工作电流, 具有欠电压保护、短路保护或接地故障保护等功能^[4]。框架式断路器在负荷较大的低压配电系统主要作0.4 kV电源进线、联络和大负荷出线开关用。

正常运行时, 若进线电源失电, 加装失电压脱扣装置的断路器可自动跳闸, 避免进线电源恢复时对电力系统造成较大冲击, 但须再次进行合闸操作才能恢复供电; 若进线电源失电, 取消失电压脱扣装置的断路器的主触头仍保持闭合状态, 当电源恢复时, 无须再次进行合闸操作也能恢复供电, 但会对电力系统造成较大冲击。

2.1 框架式断路器的联锁方式

框架式断路器的联锁方式主要有机械联锁和电气联锁。

机械联锁又称硬联锁, 是限制框架式断路器机械动作的联锁方式。机械联锁主要有杠杆联

锁、钢缆联锁和钥匙联锁三种形式。杠杆联锁适用于垂直安装的2台框架式断路器，一般要求框架式断路器间的垂直安装距离不大于0.9 m；钢缆联锁适用于2~3台框架式断路器，要求水平安装距离不大于2 m；钥匙联锁适用于2台及以上框架式断路器间的硬联锁，对各框架式断路器间的安装距离没有限制，但可靠程度较杠杆联锁和钢缆联锁低。电气联锁又称软联锁，利用框架式断路器的辅助触头设计二次控制电路，从而控制断路器的合闸线圈、储能电动机和失电压脱扣线圈回路的通断。为提高联锁装置的可靠性，通常采用机械与电气双重联锁。

为保证供电可靠性，大容量的低压配电系统宜采用多台变压器分列运行的供电方式，即多变压器供电，变压器间分列运行。当其中一台配电变压器故障检修时，切除故障变压器供电的非重要用电负荷，由另一台正常运行的变压器承担本所重要负荷用电。低压进线断路器与联络断路器间必须设置可靠的联锁装置，避免变压器并列运行。

2.2 两台配电变压器分列运行的联锁方案

2.2.1 电气联锁方案

由两台分列运行的配电变压器和3台抽出式框架式断路器组成的低压配电系统主接线简图如图3所示。两台变压器互为备用，QA₁和QA₃为低压进线断路器，两段低压母线间设置联络断路器QA₂。

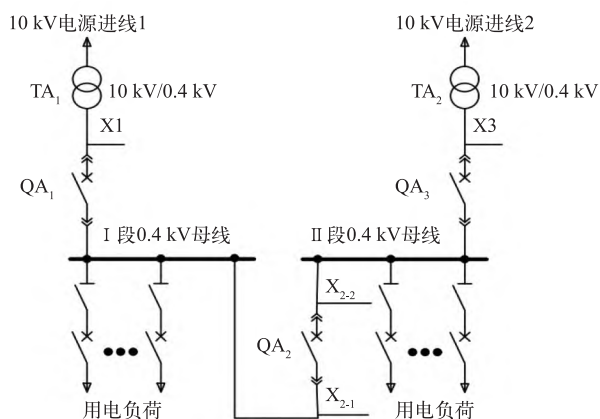


图3 两台变压器分列运行的一次系统简图

Fig. 3 Primary system diagram of two transformers running separately

正常运行时，两进线断路器QA₁和QA₃处于合闸状态，低压联络断路器QA₂处于分闸状态，两变压器分别对I段和II段0.4 kV低压母线负荷进行供电。当变压器1失电或停电检修，或进线断路器QA₁故障检修时，将不能继续对I段低压母线负荷供电。此时，根据变压器2负载率情况切除I段和II段低压母线的非重要负荷，由变压器2对I段和II段低压母线的重要负荷供电。转供电操作顺序是先分断进线断路器QA₁，切除本所非重要负荷，再合上联络断路器QA₂。当变压器2失电或停电检修，或进线断路器QA₃故障检修时，和上述情况类似，即先将故障侧进线断路器分闸，切除非重要负荷，再合上联络断路器QA₂，由正常运行的变压器对本所的重要负荷进行供电。当两台变压器失电或退出运行时，QA₁~QA₃断路器均分闸，低压系统退出运行。

两台配电变压器分列运行的联锁方案是要实现进线断路器与联络断路器“三合二”，即正常运行和故障状态下3台断路器均只能合闸2台。各断路器运行状态见表1。

表1 3台断路器运行状态

Tab. 1 Operation status of 3 circuit breakers

断路器	QA ₁	QA ₂ (联络)	QA ₃
正常运行	1	0	1
变压器1故障	0	1	1
变压器2故障	1	1	0
退出运行	0	0	0

注：“1”表示该断路器为合闸状态，“0”表示该断路器为分闸状态。

如用户要求实现无人值守和远程控制，断路器须加装失电压分励脱扣装置（该装置为选配）。断路器在合闸状态下，若进线电源失电，断路器失电压跳闸，主触头由闭合状态恢复为断开状态，辅助触头状态也随之改变，联络断路器合闸线圈得电可合闸。加装失电压分励脱扣装置的断路器，可利用中间继电器扩展辅助触头，又可避免其中1台断路器退出（拆除或摇出状态）时，手动将该断路器引至其他断路器控制电路的常闭辅助触头短接带来的不便。

居民住宅小区、商业、服务业和公共事业等电力用户的低压配电系统的断路器不加装失压脱扣装置^[5]。断路器在合闸状态下，若低压进线电源失电不会跳闸，主触头仍保持闭合状态。辅助触头状态也保持前一时刻状态。此时若合上联络断路器，倒供电将危及运维人员安全，故电气联锁控制电路只能使用断路器本身的辅助触头。运维人员须将失电电源侧进线断路器分闸后才能合上联络断路器。取消失电压脱扣装置的多变压器分列运行方式适合有人值守的配电所。

根据表1可知，引至本断路器合闸回路的控制式中的其他断路器的辅助触头为“或”关系。各断路器电气联锁控制电路如图4所示。

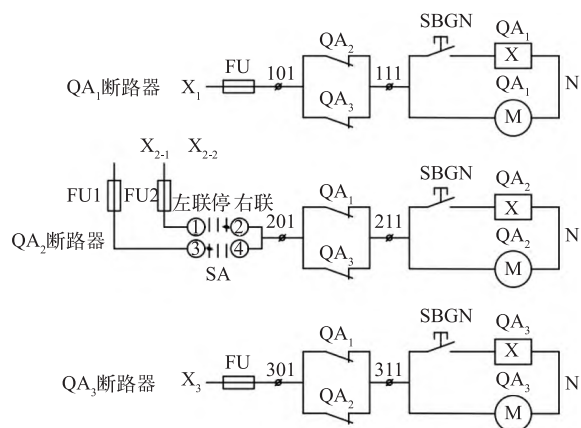


图4 3台断路器电气联锁控制电路图（取消失电压脱扣装置）
Fig. 4 Electrical interlocking control circuit diagram of 3 circuit breakers (cancel voltage loss tripping device)

图4中，X为断路器的合闸线圈；M为断路器的储能电动机；SBGN为绿色合闸按钮。二次控制电路电源由断路器参数决定，本控制电路不含分闸回路、故障和指示回路。

断路器加装失电压脱扣装置时，各断路器电气联锁控制电路如图5所示。

图5中，Q为断路器的失电压脱扣线圈；KA为中间继电器，SA为转换开关。

断路器加装失电压脱扣装置时，可使用中间继电器扩展断路器辅助触头；而断路器未加装失电压脱扣装置时，控制电路的约束关系由断路器本身的辅助触头完成，否则将导致倒供电事故，危及设备和人身安全。由于各品牌框架式断路器

的辅助触头标配数量不一致，选型时应根据电气联锁方案判断是否加装辅助触头。

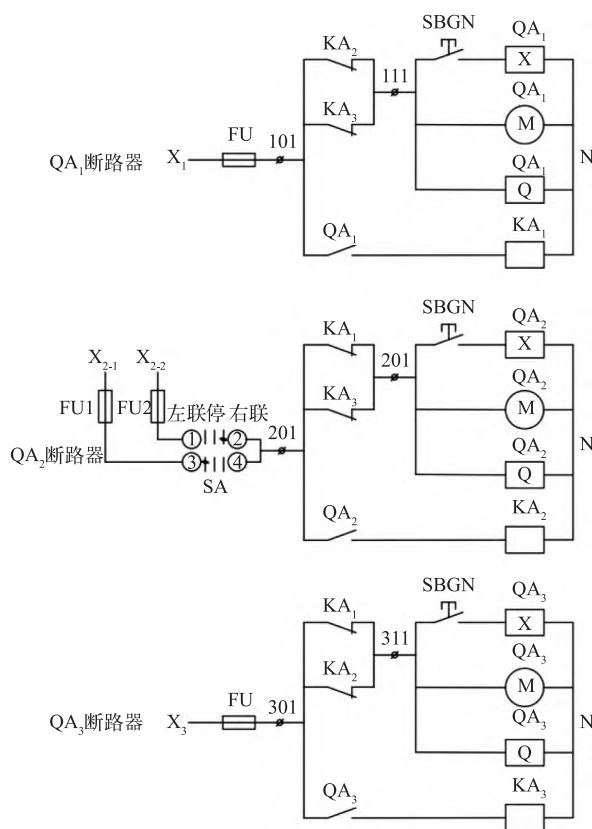


图5 3台断路器电气联锁控制电路图（加装失电压脱扣装置）
Fig. 5 Electrical interlocking control circuit diagram of 3 circuit breakers (add the loss-of-voltage release device)

2.2.2 机械联锁方案

本方案需配置3台低压框架式断路器，分别安装在二三台低压成套开关柜内。当选择2台开关柜安装时，3台低压断路器不能同时水平安装或垂直安装，杠杆、钢缆联锁方案均不适用，只能选择三锁两钥匙机械联锁方案；当选择3台开关柜安装且相邻布置时，3台低压断路器可实现水平布置，可选择钢缆联锁或三锁两钥匙机械联锁方案；当选择3台开关柜安装且未相邻布置时，只能选择三锁两钥匙机械联锁方案。

若用户低压配电系统分多期建设，且实现分期投运的变压器分列运行，工程设计选型时应注意统一进线断路器与联络断路器品牌，否则难以加装机械联锁。部分小电流等级的国产断路器不能安装机械联锁，选型时也应注意。

2.3 3台配电变压器分列运行的联锁方案

2.3.1 电气联锁方案

由3台分列运行的配电变压器和5台抽出式框架式断路器组成的低压配电系统主接线简图如图6所示，3台变压器互为备用。QA₁、QA₃和QA₅为低压进线断路器，低压母线间设置联络断路器QA₂和QA₄。

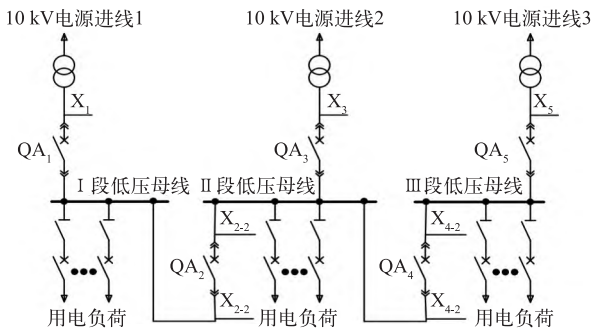


图6 3台变压器分列运行的一次系统简图

Fig. 6 Primary system diagram of 3 transformers running separately

3台配电变压器分列运行的联锁方案是要实现进线断路器与联络断路器“五合三”，即正常运行和故障状态下5台断路器均只能合闸3台。各断路器运行状态见表2。

表2 5台断路器运行状态

Tab. 2 Operation status of 5 circuit breakers

断路器	QA ₁	QA ₂ (联络)	QA ₃	QA ₄ (联络)	QA ₅
正常运行	1	0	1	0	1
变压器1故障	0	1	1	0	1
变压器2故障	1	1	0	0	1
变压器3故障	1	0	1	1	0
变压器1、2故障	0	1	0	1	1
变压器2、3故障	1	1	0	1	0
变压器1、3故障	0	1	1	1	0
退出运行	0	0	0	0	0

可根据图6分析各断路器间的“与”“或”关系并列合闸回路控制式，也可根据表2列出卡

诺图后化简得出合闸条件公式，再列出电气控制式^[6]。

分析各断路器辅助触头间的“与”“或”关系时，可将该断路器左侧和右侧所有断路器当作“块”，再逐步将“块”分解。如QA₃断路器合闸回路电气控制式，可将左侧断路器QA₁和QA₂当作“块1”，右侧QA₄和QA₅当作“块2”，块之间的关系是“与”；分解“块1”和“块2”，QA₁和QA₂是“或”关系，QA₄和QA₅间也是“或”关系；如QA₅断路器合闸回路电气控制式，无右侧断路器，将QA₁~QA₃当作“块1”，QA₄与“块1”是“或”关系，分解“块1”为QA₃和“块2”，QA₃和“块2”是“与”关系，分解“块2”，QA₂和QA₁是“或”关系。

QA₃电气控制式中各断路器间关系式为

$$QA_5 = \text{块1} \times \text{块2} = (QA_1 + QA_2) \times (QA_3 + QA_4) \quad (1)$$

QA₅电气控制式中各断路器间关系式为

$$QA_5 = QA_4 \times \text{块1} = QA_4 \times (QA_3 + \text{块2})$$
$$= QA_4 \times (QA_3 + QA_2 \times QA_1) \quad (2)$$

根据上述方法列出各断路器电气联锁控制电路如图7所示。

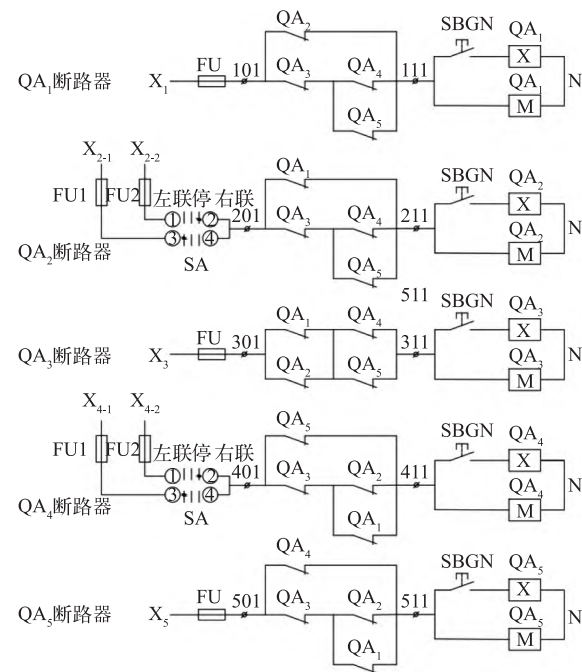


图7 5台断路器电气联锁控制电路图（取消失电压脱扣装置）

Fig. 7 Electrical interlocking control circuit diagram of 5 circuit breakers (cancel voltage loss tripping device)

断路器加装失电压脱扣装置时,各断路器电气连锁控制电路如图8所示。

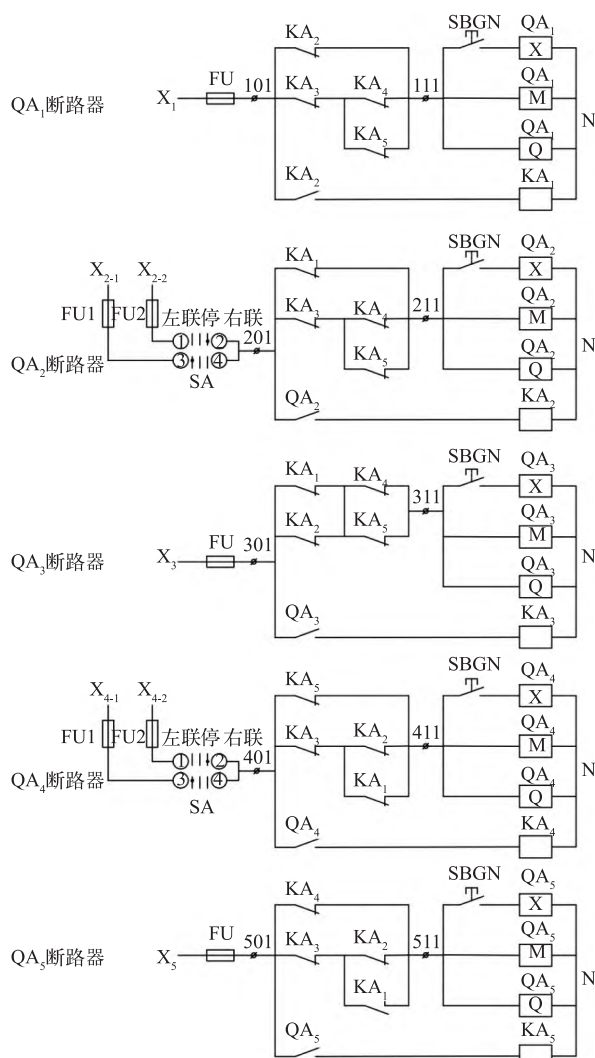


图8 5台断路器电气连锁控制电路图(加装失电压脱扣装置)
Fig. 8 Electrical interlocking control circuit diagram of 5 circuit breakers (add the loss-of-voltage release device)

2.3.2 机械连锁方案

3台配电变压器分列运行系统须配置5台低压断路器,分别安装于3台或5台低压成套开关柜。杠杆、钢缆连锁一般只适用于3台以内低压断路器间的连锁,因此本系统采用五锁三钥匙机械连锁方案。

2.4 多变压器分列运行的连锁方案

2.4.1 n 台断路器电气连锁方案模型

5台配电变压器分列运行的低压配电系统简

图如图9所示,该系统共设置9台低压断路器。

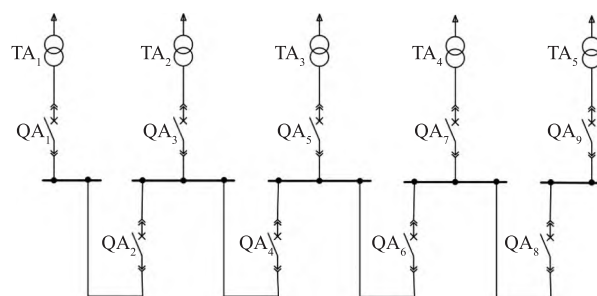


图9 5台变压器分列运行的一次系统简图

Fig. 9 Primary system diagram of 5 transformers running in columns

根据二三台配电变压器分列运行的电气连锁控制图得出第 m 台断路器电气连锁控制式规律。进线断路器:第 $m-1$ 与第 $m-2$ 台、第 $m+1$ 与第 $m+2$ 台断路器间是“或”关系,第 $m-2$ 与第 $m-3$ 台、第 $m+2$ 与第 $m+3$ 台断路器间是“与”关系,第 $m-3$ 与第 $m-4$ 台、第 $m+3$ 与第 $m+4$ 台断路器间是“或”关系,以此类推;联络断路器:第 $m-1$ 与第 $m+1$ 台断路器间是“或”关系,第 $m-1$ 与第 $m-2$ 台断路器间是“与”关系,第 $m-2$ 与第 $m-3$ 台断路器间是“或”关系,第 $m+1$ 与第 $m+2$ 台断路器间是“与”关系,第 $m+2$ 与第 $m+3$ 台断路器间是“或”关系,以此类推。9台断路器电气连锁控制式如图10所示。

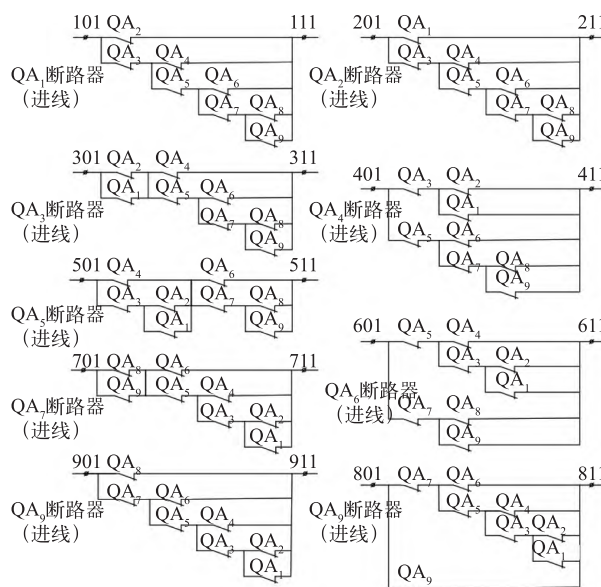


图10 9台断路器电气连锁控制式

Fig. 10 Electric interlocking control type of 9 circuit

将图10中进线断路器控制式等效变换后得到如图11所示。

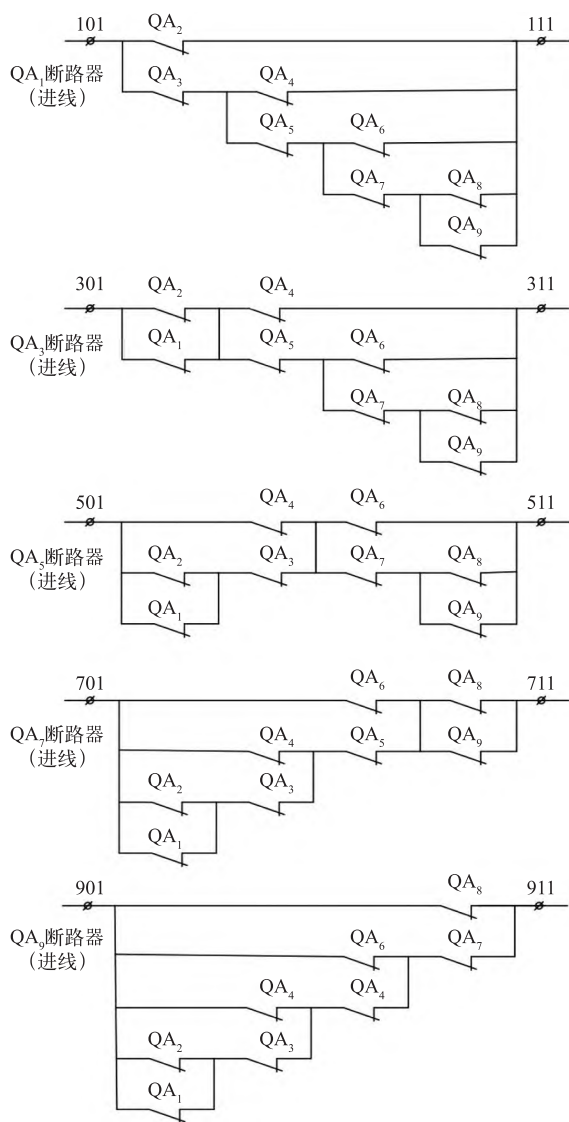


图 11 5 台变压器分列运行的进线断路器电气联锁控制式
Fig. 11 Electrical interlocking control type of incoming circuit breaker with 5 transformers running in columns

结合图10及图11，建立 X 台变压器、 n 台断路器（ $n=2X-1$ ）的电气联锁控制式模型，如图12、图13所示。其中图12为进线断路器电气联锁控制式模型，图13为联络断路器电气联锁控制式模型。图中代号为断路器序号，当断路器为进线断路器时， $1 \leq m \leq n$ ；当断路器为联络断路器时， $1 < m < n$ ，且图中代号范围在 $1 \sim n$ 之间。

若断路器取消失电压脱扣装置，常闭辅助触头数量需求较多。 X 台变压器配 n 台（ $2X-1$ ）断

路器，控制式需 $2X-2$ 对常闭辅助触点，再加上断路器本身的分合闸指示，还需考虑是否预留辅助触点至后台，因此至少共需 $2X-1$ 对常闭辅助触点，常规断路器标配为4对辅助触点，最多可加8对辅助触点，因此不能满足过多变压器分列运行。

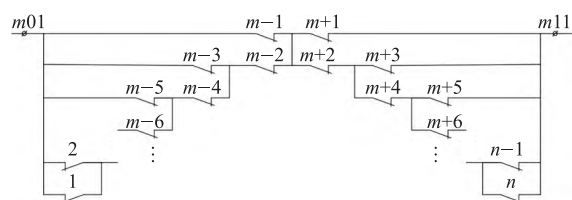


图 12 X 台变压器分列运行的进线断路器电气联锁控制式模型
Fig. 12 Electrical interlocking control model of incoming circuit breaker with X transformers operating in series

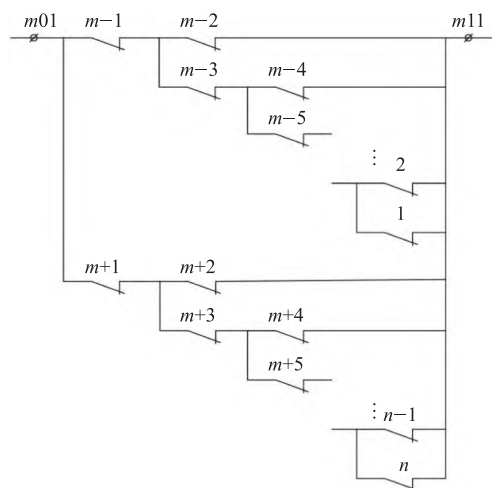


图 13 X 台变压器分列运行的联络断路器电气联锁控制式模型
Fig. 13 Electrical interlocking control model of tie circuit breaker with X transformers operating separately

2.4.2 n 台断路器机械联锁方案

X 台配电变压器分列运行系统须配置 $2X-1$ 台低压断路器，3台以上低压断路器间的联锁采用 $2X-1$ 锁 X 钥匙机械联锁方案。

3 结束语

长距离且频繁动作的断路器容易发生机械故障，辅助触头也可能发生粘连现象，因此须设置机械和电气双重联锁。多变压器分列运行的低压配电系统，应根据低压开关柜的布置、用户性质和用户需求等条件选择合适的机械联锁装置和设

计可靠的电气连锁方案,以保证低压配电系统的供电可靠性。

多变压器分列运行框架断路器选型时,应注意以下几点:

1) 所选断路器品牌及电流等级能否安装机械连锁装置。

2) 根据断路器数量及安装方式选择机械连锁装置。

3) 根据用户性质和要求选择是否加装失电压脱扣装置。

4) 取消失电压脱扣装置的断路器电气连锁方案须使用断路器本身的辅助触头,应根据电气连锁方案判断所选断路器品牌标配辅助触头数量是否满足设计要求,否则应加装辅助触头。

参考文献

- [1] 栾鹏飞,孙冬梅,张书梅.变压器并列运行程序计算器的设计[J].通信电源技术,2015(3):53-56,59.
- [2] 黄江凯.配电变压器经济运行的研究[J].建筑工程技术与设计,2014(32):672-672.

- [3] 刘旭,李忠义.变压器并列运行条件探析[J].科技世界,2012(27):244-245.
- [4] 李少戈.企业配电系统失压保护误动作原因分析及应对措施[J].科技与企业,2014(18):178.
- [5] 孙志能.低压电网欠压脱扣装置配置与安全管理[J].供用电,2016(5):65-69.
- [6] 苏景军,徐超.低压电力系统配电母线N级连锁的算法[J].中国农村水利水电,2004(3):79-81.

作者简介

黄院芳(1981—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统自动化。

葛雯(1982—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为配电网设计与咨询。

武文星(1984—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电气工程及其自动化。

龙庆文(1983—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电气工程及其自动化。

(收稿日期:2022-11-21)