

配电网三相换相开关换相策略研究

顾栋杰

国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211106

[摘要]配电网电力负荷的三相不平衡导致了配电网线路损耗、配电变压器寿命下降等问题。在换相开关式、电容器式、电力电子式三种主流的三相不平衡治理方式中,换相开关以其独特的处理方式和特点从而具有很好的处理效果。为了满足换相开关式三相不平衡治理技术的应用可靠性,文章深入研究了三相换相开关的换相技术原理以及深入分析了负载功率因数对于三相换相开关换相策略的影响。提出了一种能够提升和改善三相换相开关运行可靠性的技术方法,从而使其更好的应用于配电网,改善配电网负荷三相不平衡的现状,提升终端用户的用电质量。

[关键词]配电网;三相不平衡;换相开关;可靠性;

DOI: 10.33142/hst.v3i6.2994

中图分类号: TM761

文献标识码: A

Research on Commutation Strategy of Three Phase Commutation Switch in Distribution Network

GU Dongjie

State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211106, China

Abstract: The three-phase imbalance of power load in distribution network leads to the loss of distribution network lines and the decline of distribution transformer life. Among the three main three-phase unbalance treatment methods of commutation switch type, capacitor type and power electronic type, the commutation switch has a good treatment effect because of its unique treatment mode and characteristics. In order to meet the application reliability of three-phase unbalance control technology, this paper deeply studies the commutation technology principle of three-phase commutation switch and analyzes the influence of load power factor on the commutation strategy of three-phase commutation switch. This paper puts forward a technical method to improve the operation reliability of three-phase commutation switch, so as to make it better applied in distribution network, improve the current situation of three-phase unbalanced load in distribution network and improve the power quality of end users.

Keywords: distribution network; three phase unbalance; commutation switch; reliability

引言

随着经济社会的不断发展,对于电力能源的依赖日益提高。在国家大力倡导智能电网的背景下,智能配电网应运而生。对于智能电网,配电网是电能应用的窗口,其智能化是智能电网的重要组成部分,也是电网智能化的重要突破口¹。配电网是面向广大电力用户的,其供电可靠性不仅关系广大人民群众的生活质量,同时也是经济发展的命脉所在。从用电负荷的角度出发,配电网存在着负荷基数大,分散且不可预测的特点,从而导致了配电网低压配电线路(三相四线)中长期负荷不平衡,线路压降,供电末端电压低等问题。这些问题不仅关系到供电可靠性,同时也是建设智能配电网不可避免的问题。

三相换相开关主要致力于解决低压配电网三相负荷不平衡、减少线路损耗、提升供电末端电压等问题。三相换相开关利用继电器或半导体开关材料,调节用电负荷的供电相别,使得一条供电线路上的负荷按照负荷电流的大小均匀的分布在每一相供电回路上,从负荷端解决了供电线路上的负荷三相不平衡的问题,同时解决了某相电流过大,线损过大,末端电压过低的问题。

1 三相换相开关系统技术原理

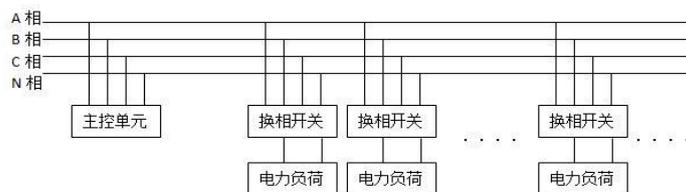


图1 三相换相开关系统模型图

三相换相开系统主要由电源换相技术，相间短路防护技术，负荷电流采集技术，信息传输技术等组成，其中电源换相技术是保证用电负荷持续运行的关键技术。

电源换相技术主要是利用继电器或半导体开关等操作器件将用电负荷从目前运行的相别转换到目标相别。目前三相换相开关的电源换相时间一般都低于 20ms，由于切换时间短暂，对于一般的用电负荷而言不会导致其停电重启。

相间短路防护技术是指在换相过程中避免在运相与换相目标相在换相过程中发生短路故障危害电网稳定运行，降低供电可靠性。

负荷电流采集技术是运用电流互感器采集负荷端用电负荷电流的大小，实时跟踪用电负荷的波动，从而能够及时的将用电信息上传至终端控制器，便于终端控制器制定出有效的动作算法，保证供电回路的负荷平衡。

信息传输技术是三相换相开关与终端控制器连接的桥梁，具有抗干扰、安全性等特点，对于控制三相换相开关的动作有着重要的意义。

2 电源换相技术原理

电源换相要求换相时对负荷的影响尽可能的减小，所以要求换相开关具备过零换相的能力。过零换相是指在交流电压过零点的时候投入，在交流负荷电流过零点的时候切除。

换向开关的换相技术策略按照换相方向来分类，可分为顺序换相方式与逆序换相方式两类，顺序换相方式是指将负载按照 A 相切换至 B 相，B 相切换至 C 相，C 相切换至 A 相的顺序进行换相的方式；逆序换相方式是指将负载按照 A 相切换至 C 相，C 相切换至 B 相，B 相切换至 A 相的顺序进行换相的方式。

以纯阻性负载为例，分析两种换相方式的动作特点及时间特性。由于纯阻性负载功率因数为 1，理论上电压与电流的相位相同，根据过零换相的要求，纯阻性负载的电流过零切除也可认为是电压过零切除。

初始负载在 A 相向 B 相进行顺序换相时，换相窗口时间 20ms 内，即 A 相电压周期内，B 相电压存在两次过零点，即有两次换相目标点。如图 2 所示，初始 A 相负载在电压过零点切除，在 B 相过零点 1 或过零点 2 投入。

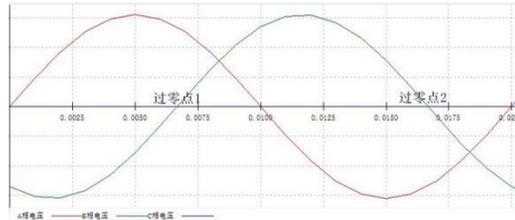


图 2 A、B 相电压相位波形图

A 相至 B 相顺序换相，起始时刻，负载从 A 相切除，可以从图中过零点 1 投入，也可以从图中过零点 2 投入。由 B 相电压滞后 A 相电压 120° 可知：

$$\text{过零点 1 时间: } T_1 = 120/360 \times 20\text{ms} = 6.67\text{ms}$$

$$\text{过零点 2 时间: } T_2 = (120 + 180)/360 \times 20\text{ms} = 16.67\text{ms}$$

换相理论波形如下图 3、4 所示

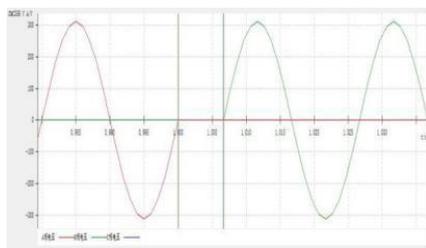


图 3 电压中断 T₁ 时刻顺序换相波形示意图

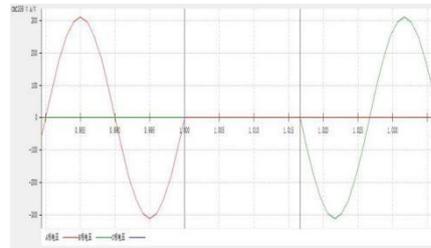


图 4 电压中断 T₂ 时刻顺序换相波形示意图

初始负载在 A 相向 C 相进行逆序换相时，换相窗口时间 20ms 内，即 A 相电压周期内，C 相电压存在两次过零点，即有两次换相目标点。如图 5 所示，初始 A 相负载在电压过零点切除，在 C 相过零点 1 或过零点 2 投入。

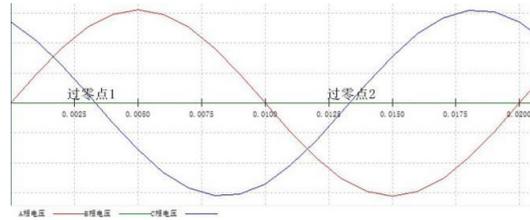


图5 A、C相电压相位波形图

A相至B相顺序换相,起始时刻,负载从A相切除,可以从图中过零点1投入,也可以从图中过零点2投入。由C相电压超前A相电压 120° 可知:

$$\text{过零点1时间: } T_1 = 60/360 \times 20\text{ms} = 3.33\text{ms}$$

$$\text{过零点2时间: } T_2 = (60 + 180)/360 \times 20\text{ms} = 13.33\text{ms}$$

换相理论波形如下图6、7所示

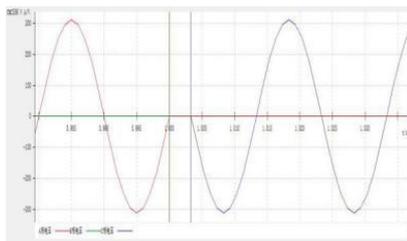


图6 电压中断 T_1 时刻逆序换相波形示意图

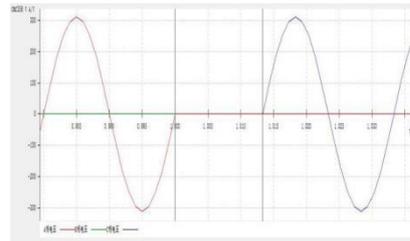


图7 电压中断 T_2 时刻逆序换相波形示意图

纯阻性负载作为理想负载,一般用于分析特定的电气参数,而换相开关系统应用于配电网低压配电系统中,该系统中的负载大部分为阻感性负载。因而纯阻性负载换相理论分析得出了基于顺序换相和逆序换相方式的四种不同换相时间的换相策略,对于实际负荷的换相应用,其参考意义还有一定的局限性。

3 负载功率因数对换相策略的影响

换相开关的换相动作是基于“过零换相”理论的,对于实际的阻感性电力负荷,其电压电流存在一定的相位差,所以换相开关的动作时间与纯阻性负载下的动作时间必然有较大的差异。

阻感性负载功率因数介于1到0之间,换算至波形图上,电压与电流之间的相位差介于 0° 到 90° 之间。通过三相电压波形图中每相电压过零点的分布可以发现,在A相电压过零点后的半个周期范围内,即阻感性负载功率因数范围内,C相电压过零点,且C相电压过零点的位置为滞后A相电压过零点 60° ,换算成A相阻感性负载功率因数为0.5。

3.4 阻感性负载功率因数介于1到0.5的换相分析

以A相负载换相为例,负载为阻感性负载,功率因数介于1.0到0.5之间,则负载切除时间为负载电流过零时间,以A相电压过零时刻为起始点计时。

$$\text{功率因数为1.0时负荷电流第一次过零时间为: } T_{I1} = 0/360 \times 20\text{ms} = 0.00\text{ms};$$

$$\text{功率因数为0.5时负荷电流第一次过零时间为: } T_{I2} = 60/360 \times 20\text{ms} = 3.33\text{ms};$$

负荷电流过零切除时间 T_I 则介于0.00ms到3.33ms之间。

当A相向B相顺序换相时,由纯阻性负载分析可知,在20ms换相时间窗口内,B相电压过零点相对于A相电压过零点的时间分别为6.67ms和16.67ms。由此可知A相顺序换相至B相时负载电压中断时间为:

$$T_{U1}: 6.67\text{ms} \sim 3.33\text{ms};$$

$$T_{U2}: 16.67\text{ms} \sim 13.33\text{ms}。$$

当A相向C相逆序换相时,由纯阻性负载分析可知,在20ms换相时间窗口内,C相电压过零点相对于A相电压过零点的时间分别为3.33ms和13.33ms。由此可知A相逆序换相至C相时负载电压中断时间为:

$$T_{U1}: 3.33\text{ms} \sim 0.00\text{ms};$$

$$T_{U2}: 13.33\text{ms} \sim 10.00\text{ms}。$$

3.2 阻感性负载功率因数介于0.5到0的换相分析

以A相负载换相为例,负载为阻感性负载,功率因数介于0.5到0.0之间,则负载切除时间为负载电流过零时间,以A相电压过零时刻为起始点计时。

功率因数为 0.5 时负荷电流第一次过零时间为： $T_{I1} = 60/360 \times 20\text{ms} = 3.33\text{ms}$ ；
 功率因数为 0.0 时负荷电流第一次过零时间为： $T_{I2} = 90/360 \times 20\text{ms} = 5.00\text{ms}$ ；
 负荷电流过零切除时间 T_I 则介于 3.33ms 到 5.00ms 之间。

当 A 相向 B 相顺序换相时，由纯阻性负载分析可知，在 20ms 换相时间窗口内，B 相电压过零点相对于 A 相电压过零点的时间分别为 6.67ms 和 16.67ms。由此可知 A 相顺序换相至 B 相时负载电压中断时间为：

$T_{U1}: 3.33\text{ms} \sim 1.67\text{ms}$ ；
 $T_{U2}: 13.33\text{ms} \sim 11.67\text{ms}$ 。

当 A 相向 C 相逆序换相时，由纯阻性负载分析可知，在 20ms 换相时间窗口内，C 相电压过零点相对于 A 相电压过零点的时间分别为 3.33ms 和 13.33ms。由于 C 相电压的第一次过零点 3.33ms 小于了 A 相负荷电流过零切除的最小时间，所以 C 相无法在第一次电压过零时换相成功，在负载切除后 C 相电压第一次过零点出现在距离 A 相电压过零点的 13.33ms 处，第二次过零点出现在距离 A 相电压过零点的 23.33ms 处，由此可知 A 相逆序换相至 C 相时负载电压中断时间为：

$T_{U1}: 10.00\text{ms} \sim 8.33\text{ms}$ ；
 $T_{U2}: 20.00\text{ms} \sim 18.33\text{ms}$ 。

综上所述，当三相换相动作策略引入负载功率因数影响后，与纯阻性负载条件下的分析结果出现了较大的差别。由于负载的实际情况，在实际应用过程中，这种影响无法避免也无法消除。

4 换相策略分析

对纯阻性负载的换相分析得出了在 20ms 换相窗口时间内基于顺序换相和逆序换相的四种换相策略，对阻感性负载的换相分析得出在不同功率因数下换相方式及换相电压中断时间的差异。根据前文分析的结果相关数据如表 1。

表 1 负载类型与换相时间关系表

负载类型	换相方式	换相相别	负载功率因数	换相负载电压中断时间 (ms)		
				目标相电压第一次过零点换相	目标相电压第二次过零点换相	目标相电压第三次过零点换相
纯阻性负载	顺序换相	A 相→B 相	1.0	6.67	16.67	/
	逆序换相	A 相→C 相	1.0	3.33	13.33	/
阻感性负载	顺序换相	A 相→B 相	1.0~0.5	3.33~6.67	13.33~16.67	/
			0.5~0.0	1.67~3.33	11.67~13.33	/
	逆序换相	A 相→C 相	1.0~0.5	0.00~3.33	10.00~13.33	/
			0.5~0.0	/	8.33~10.00	18.33~20.00

由表 1 中换相时间数据分布可知，对于配电低压系统中的非敏感类负荷造成的三相负荷不平衡，可以使用三相换相技术在负载侧进行三相不平衡治理。由于负荷的功率因数是一个动态随机不可控的参数，在换相系统中执行换相操作时应综合考虑换相时间，换相电流冲击，换相防止相间短路等多种因素。所以在基于半导体技术开发的小电流容量换相开关，因其具有动作快速等特点，在目标电压第一次过零点进行顺序换相具有一定的优势；对于基于继电器技术开发的大电流容量换相开关，因其具有通断大电流等特点，在目标电压第二次过零点进行逆序换相具有很好的动作效果。

5 结论

本文分析了换相开关动作原理，并结合实际负荷状况分析了四种换相策略的动作参数，其分析结果对于换相开关动作策略有着重要的参考意义，为解决低压配电侧三相负荷不平衡造成的线损、电压降落有一定的帮助，对配电网负荷的控制调节有一定的作用。

[参考文献]

- [1] 秦立军, 马其燕. 智能配电网及其关键技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 张文斌等. 基于三相负荷不平衡控制的电网节能降损技术研究[J]. 节能, 2013(12): 15-18.
- [3] 孙建东等. 配电台区三相不平衡治理方案分析[J]. 自动化与仪器仪表, 2015(11): 147-148.

作者简介: 顾栋杰 (1989.8-) 男, 南京工程学院, 电气工程及其自动化, 国网电力科学研究院有限公司, 检验员, 中级工程师。