

低压脱扣器电子电路电压暂降敏感特性试验研究

欧阳森,李翔,刘平,刘丽媛

(华南理工大学 电力学院 广东省绿色能源技术重点实验室,广东 广州 510640)

摘要: 在对低压脱扣器电磁结构的工作状态进行简要分析的基础上,制定试验方案,建立基于自主研制的电压暂降发生仪的试验平台。以 220 V 低压脱扣器为对象,进行了电子电路电压暂降敏感特性试验,获取低压脱扣器电子电路在输入不同暂降信号时的输出电压波形。结合低压脱扣器的电压耐受曲线,将电子电路的工作状态划分为幅值较小、幅值较大、持续时间较短、持续时间较长、中间的幅值和持续时间、正常工作 6 种模式。分析了每种模式下电子电路的输入和输出电压实测波形及其对低压脱扣器动作情况的影响,结果表明:电子电路的输出电压波形与输入电压暂降信号的幅值和持续时间呈现规律的关联关系,输出电压波形具有明显的分阶段特征,决定了低压脱扣器的动作特性。

关键词: 低压脱扣器; 电子电路; 电磁结构; 电压暂降敏感特性

中图分类号: TM 56

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.032

0 引言

低压脱扣器是低压断路器中的核心装置,在电压跌落到一定程度时使断路器断开,保护下游的设备安全,在电力系统中应用非常广泛。在电网实际运行中,电压暂降已逐渐成为最严重的电能质量问题^[1-4]。据文献^[5],近年来,南方电网珠三角地区发生了数起输电线路相间故障导致电压暂降,进而引起低压脱扣器跳闸导致负荷大量损失的事件,给电力用户带来巨大的经济损失。如何在保证安全的前提下,尽可能减小甩负荷量是值得思考的问题。目前而言,一种合理的解决途径是对用户进行电压暂降敏感等级划分,对不同等级的用户配置不同动作阈值的保护装置。

美国的信息技术工业协会(ITI)针对电力系统中大型计算机对电能质量的要求,从幅值和持续时间 2 个维度制定了电压容限曲线(ITI 曲线),该曲线被 IEEE Std 446—1980 标准收录,为生产厂家、用户、供电企业都提供了有价值的参考。而目前我国的行业或者国家标准中对于低压脱扣器动作范围的规定只涉及电压幅值,且非常粗略。如市场上生产的合格的低压脱扣器都满足现行国标 GB 14048.1—2012^[6]的要求,但是其真实的动作范围和动作特性则不清楚,难以满足应对电压暂降的需求。在此背景下,对低压脱扣器的电压暂降敏感特性进行研究具有重要的科研价值和工程意义。

针对用电设备电压暂降敏感性,目前国内学者开展了广泛的试验研究,但所研究设备集中于交

流接触器^[7-8]、调速驱动装置^[9]、计算机^[10]、照明灯具^[11],研究低压脱扣器电压暂降敏感性的文献很少。文献^[12]首次尝试对低压脱扣器的电压暂降敏感特性进行了试验分析,但未能从机理上对低压脱扣器在电压暂降作用下的动作特性进行解析。低压脱扣器通常是由电子电路和电磁结构组成,这两部分的协同作用决定了其整体的动作特性。其中电磁结构只是动作的执行部分,研究电磁结构特性的文献较多,从经典的磁路计算^[13-14],到近些年的有限元分析和 ANSYS 软件仿真^[15-18],可见对电磁结构的研究已非常成熟;而电子电路负责电压的采样、分析,并向电磁结构输出动作或者不动作的信号,对低压脱扣器的动作性能起着决定性的作用。因此,对低压脱扣器电子电路进行电压暂降敏感特性研究,将对其电压暂降特性的动作机理有更深入的认识,此研究内容目前尚无相关标准、论文等。

本文首次采用试验方法对低压脱扣器电子电路的电压暂降敏感特性进行研究。首先,采用磁路方法深入分析低压脱扣器电磁结构存在的 4 种工作状态,即吸持、释放、吸合和分离;然后,改进文献^[12]中所述试验方案,选取市场上主流的若干种不同型号的低压脱扣器进行电压暂降敏感特性试验,得出其电压耐受曲线,同时记录电子电路部分在不同电压暂降信号作用下的输出电压波形;最后,依据电压耐受曲线,划分出 6 种不同的工作模式,以某款低压脱扣器为例,分析电子电路部分在每种模式下的输出电压波形特性,实现电子电路部分电压暂降敏感性的研究,同时结合电磁结构的动作特性,阐述了低压脱扣器电压暂降作用下的动作机理。

1 现行国标规定

我国现行的多项国家标准中,涉及脱扣器及其电

收稿日期:2015-09-21;修回日期:2016-10-30

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(2016A030313476)

Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province(2016A030313476)

子控制器的保护特性和试验的规定如下。

GB 14048.1—2012 标准中规定:欠电压继电器或脱扣器与开关电器组合在一起,当外施电压下降,甚至缓慢下降到额定电压的 70% 至 35% 范围内时,与开关电器组合在一起的欠电压继电器和脱扣器应动作,使电器断开;当外施电源电压低于欠电压继电器或脱扣器的额定电压的 35% 时,欠电压继电器和脱扣器应防止电器闭合;当外施电源电压等于或高于其额定电压的 85% 时,欠电压继电器和脱扣器应保证电器能闭合。

GB/T 22710—2008^[19] 标准中,对低压脱扣器的电子控制器的欠电压保护特性进行了规定,给出了控制器的动作电压阈值为 $0.35U_e \sim 0.70U_e$ (U_e 为低压脱扣器额定工作电压),这与 GB 14048.1—2012^[6] 规定的低压脱扣器的动作电压阈值一致。

GB/T 17626.11—2008^[20] 标准中,规定了电压暂降试验优先采用的试验等级和持续时间。其中明确给出的最严酷的等级为 3 类的要求,在电压频率为 50 Hz 的情况下,优先采用的电压暂降的试验等级和持续时间组合有:40% U_e —200 ms、70% U_e —500 ms、80% U_e —5000 ms。

这些国标对本文的试验研究提供了重要参考。

2 低压脱扣器电磁结构动作原理分析

低压脱扣器主要由电子电路和电磁结构两部分组成。其中,电子电路主要由电源输入端、滤波、整流、电压采样、处理及线圈驱动构成;电磁结构由磁轭、励磁线圈、静铁芯、动铁芯和反力弹簧等组成。

电磁结构的原理图如图 1 所示。图 1 中, u_0 为电子电路的输出电压,即电磁结构中励磁线圈的输入电压; i 为励磁电流; k 为反力弹簧的弹性系数; x 为动静铁芯之间的距离; l 为动铁芯在磁场中的部分的长度。

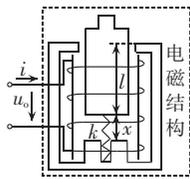


图 1 电磁结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic mechanism

低压脱扣器的动作由电磁结构中的动铁芯来完成。动铁芯受到反力弹簧的弹力、静铁芯的电磁吸力、重力、摩擦力和空气阻力等的作用,这里只考虑弹簧弹力和电磁吸力。

设动静铁芯吸持状态下反力弹簧的压缩量为 x_0 ,脱扣器动作过程中 x 的最大值为 x_1 ,励磁线圈匝数为 N 。

动铁芯受到的弹簧弹力为:

$$F_1 = k(x_0 - x) \quad (1)$$

忽略漏磁通,可画出电磁结构的磁路图,如图 2 所示。图 2 中, F 为磁动势, $F = iN$; R_1 为动铁芯的磁

阻; R_2 为动铁芯与静铁芯之间的磁隙磁阻; R_3 为静铁芯磁阻; R_4 为磁轭磁阻; R_5 为动铁芯与磁轭之间的磁隙磁阻; ϕ 为磁通量。其中, R_3 、 R_4 、 R_5 为常量,其余为变量。

则有:

$$F = \phi(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5) \quad (2)$$

$$R_1 = l / (\mu_1 S) \quad (3)$$

$$R_2 = x / (\mu_0 S) \quad (4)$$

$$F_2 = c\phi^2 \quad (5)$$

其中, μ_0 为空气的导磁系数; μ_1 为动铁芯的导磁系数; S 为动铁芯的截面积; F_2 为动铁芯受到的电磁吸力; c 为常数。

电磁结构存在吸持、释放、分离和吸合 4 种不同的工作状态。

结合式(1) — (5) 进行分析,易得到如下结论:电磁结构从吸持状态进入释放过程,只需要适当降低励磁线圈输入电压,使其低于临界电压;从分离状态进入吸合过程,则需要向励磁线圈输入很大的启动电压。释放过程和吸合过程一旦启动,条件会越来越利于动铁芯动作完成,即具有“自加速效应”。

图 3 为低压脱扣器电子电路部分的示意图。电磁结构的输入电压就是电子电路的输出电压,因此电磁结构的动作情况完全由电子电路的输出电压来控制。若要分析低压脱扣器电压暂降作用下的动作机理,则必须对其电子电路部分进行深入研究,本文采用试验方法,分析其电子电路的电压暂降敏感特性。



图 3 低压脱扣器电子电路部分示意图

Fig.3 Electronic circuit of low-voltage release

3 低压脱扣器电子电路电压暂降敏感特性试验

3.1 试验平台

本文对文献[12]中所述的试验平台进行改进,设计了测试低压脱扣器电子电路电压暂降敏感特性的试验平台,原理图如图 4 所示。图 4 中,电压暂降发生装置采用自行研制的电压暂降发生装置^[21],可以

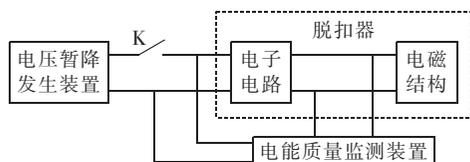


图 4 试验平台原理图

Fig.4 Schematic diagram of experimental platform

产生电压暂降信号,提供给被测试低压脱扣器。电能质量监测装置采用日置 HIOKI3196,该装置具有交流通道和直流通道,其交流通道用于监测电子电路的输入电压暂降信号,确保信号准确、可靠;直流通道用于监测电子电路的输出电压波形。

3.2 试验步骤

试验步骤具体如下。

a. 调节电压暂降发生仪,使其输出电压幅值为低压脱扣器额定工作电压 U_e ,然后闭合开关 K,待低压脱扣器通电稳定工作后开始试验。记录此时电子电路的输入和输出电压波形。

b. 电压暂降起始点相位设置为 0° 保持不变,电压暂降幅值 u 从 $10\%U_e$ 开始,以 $5\%U_e$ 为步长,由小到大进行调节,调节范围为 $10\%U_e \sim 90\%U_e$ 。

c. 对于每个确定的电压暂降幅值,持续时间 t 从 10 ms 开始,以 1 ms 为步长由小到大进行调节,调节范围为 $10 \text{ ms} \sim 1 \text{ min}$ 。

d. 每组确定幅值以及持续时间的电压暂降下的试验都要重复 10 次,为避免相邻 2 次试验相互影响,每 2 次试验之间的时间间隔在 10 s 以上。

e. 记录每组确定幅值以及持续时间的电压暂降下低压脱扣器的动作情况及电子电路的输入、输出电压波形。

3.3 试验结果

按照本文建立的试验平台和试验步骤对市场上主流的若干种不同型号的低压脱扣器进行了试验,各款低压脱扣器的动作特性和电子电路的输入输出特性在定量分析上存在差异,而定性分析时则基本一致。限于篇幅,本文以某款 AC 220 V 低压脱扣器为例进行分析,为叙述方便起见,假设其型号为 T 型。

试验结果包括:T 型低压脱扣器在试验电压暂降信号下的动作情况数据;T 型低压脱扣器的电子电路在试验电压暂降信号下的输入和输出电压波形图。

4 试验结果初步分析

4.1 基本数据分析

由于电子电路与低压脱扣器的动作特性密切相关,绘制低压脱扣器的电压耐受曲线,是研究电子电路的电压暂降敏感特性的基础。

根据 T 型低压脱扣器动作情况,统计出不同电压暂降幅值 U 下,其确定不动作的最大持续时间 t_1 和确定动作的最小持续时间 t_2 ,如表 1 所示,进而绘制出其电压耐受曲线,如图 5 所示。

4.2 电子电路输入、输出电压波形总体分析

由图 5 中低压脱扣器电压耐受曲线可看出,低压脱扣器在电压暂降作用下的动作特性包括动作区域、不动作区域和模糊区域 3 个区域。模糊区域表示低压脱扣器有时动作,有时不动作。

表 1 T 型低压脱扣器的试验结果

Table 1 Experimental results of T-type low-voltage release

$(U/U_e)/\%$	t_1/ms	t_2/ms	$(U/U_e)/\%$	t_1/ms	t_2/ms
50	82	91	25	44	54
45	50	71	20	42	53
40	49	57	15	30	51
35	48	57	10	30	50
30	46	57			

注:电压暂降幅值大于 $50\%U_e$,持续时间在 $10 \text{ ms} \sim 1 \text{ min}$ 变化时,T 型低压脱扣器始终不动作。

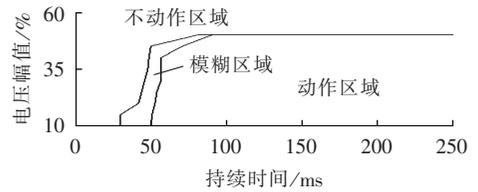


图 5 T 型低压脱扣器电压耐受曲线

Fig.5 Voltage tolerance curve of T-type low-voltage release

输入电压暂降信号时,根据低压脱扣器动作与否,可将电子电路的输出电压波形分为不动作波形和动作波形。当电子电路输出电压波形为不动作波形时,低压脱扣器不动作;当电子电路输出电压波形为动作波形时,低压脱扣器动作。

4.2.1 未输入电压暂降信号时的正常工作波形

当向 T 型低压脱扣器输入 220 V 工频交流电压时,电子电路的输出为周期性波动的直流电压,波峰 35 V ,波谷 31 V ,如图 6 所示。

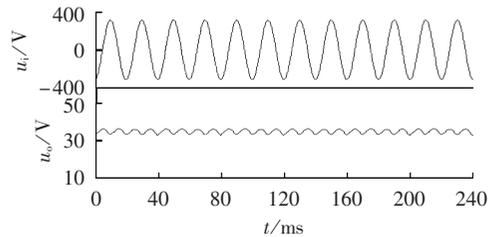


图 6 正常工作状态下电子电路输入和输出电压波形

Fig.6 Input and output voltage waveforms of electronic circuit in normal operation mode

4.2.2 不动作波形

统计发现,不动作波形都由下降和上升 2 个阶段组成,且下降阶段与输入电压暂降信号是完全对应的。

以 $40\%U_e - 50 \text{ ms}$ 电压暂降为例,该情形下电子电路输入、输出电压波形如图 7 所示。

由图 7 可见, $40\%U_e - 50 \text{ ms}$ 电压暂降下,低压脱扣器处于不动作区域,与图 5 相吻合。

4.2.3 动作波形

统计发现,动作波形都由下降、低压和高压 3 个阶段组成,且下降阶段与输入电压暂降信号是完全对应的。在低压阶段,电子电路输出电压接近为 0 ,高压阶段电压峰值接近 300 V 。

假设电子电路输入电压暂降的持续时间为 t_1 ,下

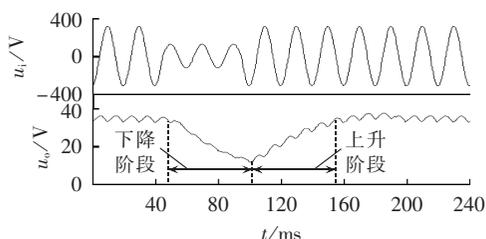


图 7 40% U_e -49 ms 电压暂降下电子电路输入和输出电压波形

Fig.7 Input and output voltage waveforms of electronic circuit for 40% U_e -49 ms voltage sag

降阶段和低压阶段的总持续时间为 t_2 , 高压阶段的持续时间为 t_3 , 且始终满足 $t_2 \approx t_1 + 400$ ms、 $t_3 \approx 110$ ms。

在低压阶段, 电磁结构进入释放过程, 并到达分离状态, 在高压阶段, 电磁结构进入吸合过程, 并重新回到吸持状态。整个动作波形, 即对应低压脱扣器的一次完整的动作过程。

以 40% U_e -110 ms 电压暂降为例, 该情形下的电子电路输入、输出电压波形, 如图 8 所示。对图 8 中 [0, 240 ms] 部分进行局部放大, 如图 9 所示。

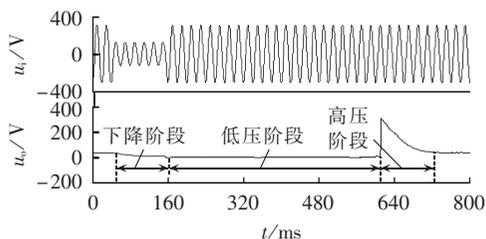


图 8 40% U_e -110 ms 电压暂降下电子电路输入和输出电压波形

Fig.8 Input and output voltage waveforms of electronic circuit for 40% U_e -110 ms voltage sag

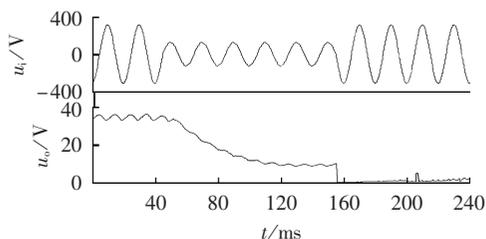


图 9 图 8 的局部放大图

Fig.9 Partial enlarged detail of fig.8

由图 8、9 可见, 40% U_e -110 ms 电压暂降下, 低压脱扣器处于动作区域, 与图 5 相吻合。

由于电子电路的所有动作波形的低压阶段和高压阶段具有相同的规律, 下面分析动作波形时, 都不再示出完整的动作波形, 只示出其下降阶段。

5 低压脱扣器电子电路电压暂降下工作模态分析

为进一步掌握低压脱扣器电子电路在不同电压暂降信号作用下, 输出电压波形的变化规律, 从而解

析低压脱扣器电压暂降作用下的动作机理, 本文依据电压耐受曲线分布特征, 采用模态划分的方法研究低压脱扣器电子电路输出电压波形变化特征。

5.1 工作模态划分

为不失一般性, 以低压脱扣器通用的电压耐受曲线^[12]为基础, 进行电子电路工作模态的划分。图 10 给出了低压脱扣器电压耐受曲线, 图 11 给出模态划分示意图, 相同的灰色表示同一种工作模态。

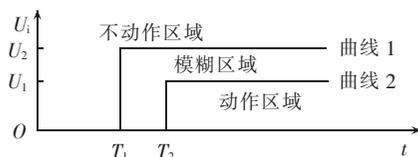


图 10 低压脱扣器电压耐受曲线

Fig.10 Voltage tolerance curve of low-voltage release



(a) 模态 1, 2, 3



(b) 模态 3, 4, 5

图 11 低压脱扣器电子电路工作模态的划分

Fig.11 Partition of electronic circuit working mode for low-voltage release

模态划分参照控制变量的思想, 当有多个变量共同决定结果时, 确定其他变量, 观察单一变量的变化对结果的影响。

图 10 中的 2 个变量——幅值和持续时间, 共同决定电子电路输出电压的变化, 模态 1 和 2 确定幅值, 观察持续时间对电子电路输出电压的影响; 模态 4 和 5 确定持续时间, 观察幅值对电子电路输出电压的影响; 模态 3 是模糊区域, 较为特殊, 单独分析; 定义模态 6 为输入电压为额定电压时, 电子电路的工作状态。

各模态下电磁结构的工作状态及低压脱扣器的动作特性见表 2。

5.2 不同模态下电子电路输出电压波形分析

以 T 型低压脱扣器为例进行分析。对比图 5 和图 10, 仿效文献^[12]中的近似矩形处理方法, 对图 5 作近似矩形处理, 如图 12 所示。

对比图 10 和图 12, 可知图 12 中: $U_1 = U_2 = 50\%U_e$, $T_1 = 38$ ms, $T_2 = 70$ ms。为节省篇幅, 本节中不再给出电子电路的输入电压波形, 仅对不同模态下电子电路

表 2 各种模态下电磁结构工作状态及
低压脱扣器动作特性

Table 2 Working state of electromagnetic mechanism and operating feature of low-voltage releases for different modes

模态	含义	对应数学表达	电磁结构 工作状态	动作情况
1	U_i 较小	$U_i < U_1$ 且 $t > T_2$ $U_i < U_2$ 且 $t < T_1$	释放-分离-吸合 吸持	动作 不动作
2	U_i 较大	$U_i > U_2$	吸持	不动作
3	U_i, t 适中	$T_1 < t < T_2$ 且 $U_i < U_2$ 或 $U_i < U_1 < U_2$ 且 $t > T_2$	吸持或 释放-分离-吸合	动作或 不动作
4	t 较短	$t < T_1$	吸持	不动作
5	t 较长	$t > T_1$ 且 $U_i > U_2$ $t > T_2$ 且 $U_i < U_1$	吸持 释放-分离-吸合	不动作 动作
6	额定输入	$U_i = U_e$	吸持	不动作

注: U_i 和 t 分别为图 3 中输入电子电路的电压暂降信号的幅值和持续时间。

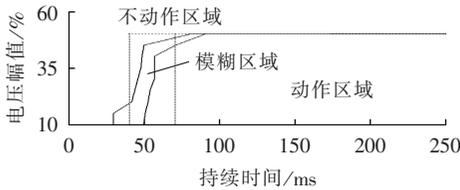


图 12 T型低压脱扣器电压耐受曲线近似矩形处理
Fig.12 Approximate rectangle processing of voltage tolerance curve for T-type low-voltage release

输出电压波形作比较分析。另外,已知 T 型低压脱扣器电磁结构维持吸持状态的最低直流电压为 10 V 左右。

5.2.1 模态 1

以电压暂降幅值为 $10\%U_e$ 为例,该情形下的电子电路输出电压波形如图 13 所示。图中波形由上至下分别对应的是 $10\%U_e-10\text{ms}$ 、 $10\%U_e-30\text{ms}$ 、 $10\%U_e-70\text{ms}$ 、 $10\%U_e-90\text{ms}$ 电压暂降。

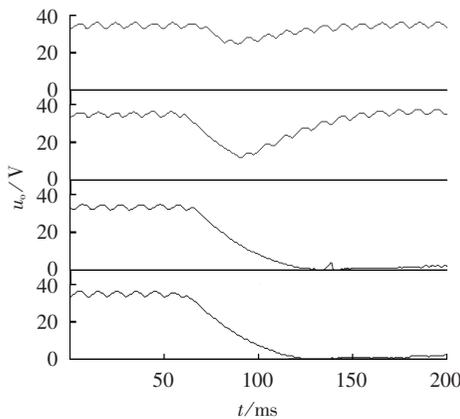


图 13 电压暂降幅值为 $10\%U_e$ 时电子电路输出电压波形

Fig.13 Output voltage waveforms of electronic circuit for $10\%U_e$ voltage-sag

电压暂降幅值为 $10\%U_e$,持续时间从 10 ms 到 30 ms 变化时,电子电路输出电压波形为不动作波形,

由下降阶段和上升阶段组成。随着持续时间增大,下降阶段的坡度和深度增加,但波形最低点电压始终大于 10 V,电磁结构维持吸合状态,低压脱扣器不动作。

电压暂降幅值为 $10\%U_e$,持续时间从 70 ms 增加时,电子电路输出电压波形为动作波形,由下降阶段、低压阶段和高压阶段组成。随着电压暂降持续时间增大,电子电路输出电压波形的下降阶段的下跌坡度和深度都未发生明显变化。在低压阶段,电子电路输出电压持续小于 10 V,电磁结构进入释放-分离-吸合过程,低压脱扣器动作。

5.2.2 模态 2

以电压暂降幅值为 $70\%U_e$ 为例,该情形下的电子电路输出电压波形如图 14 所示。图中波形从上至下分别对应 $70\%U_e-10\text{ms}$ 、 $70\%U_e-30\text{ms}$ 、 $70\%U_e-50\text{ms}$ 、 $70\%U_e-70\text{ms}$ 、 $70\%U_e-90\text{ms}$ 电压暂降。

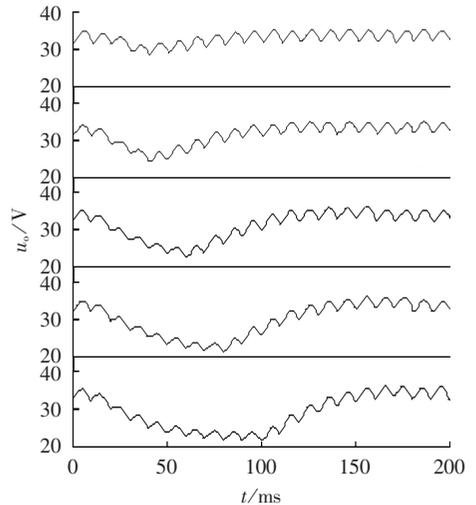


图 14 电压暂降幅值为 $70\%U_e$ 时电子电路输出电压波形

Fig.14 Output voltage waveforms of electronic circuit for $70\%U_e$ voltage-sag

由图 14 可见,电压暂降幅值为 $70\%U_e$ 时,电子电路输出电压波形都为不动作波形,由下降阶段和上升阶段组成。随着持续时间的增加,下降阶段时间增加,但电压下降幅度逐渐变缓,波形最低点电压始终在 10 V 以上,电磁结构维持吸合,低压脱扣器不动作。

5.2.3 模态 3

以电压暂降幅值为 $45\%U_e$,持续时间为 70 ms 为例,该情形下的电子电路波形见图 15。由图 15 可知,该条件下 T 型低压脱扣器处于模糊区域。重复相同的电压暂降信号多次,得到了 2 种电子电路输出电压波形,如图 15 所示。波形 1 和波形 2 中的点 Z 对应电压暂降信号结束时刻。

由图可见,同样是在 $45\%U_e-70\text{ms}$ 电压暂降下,

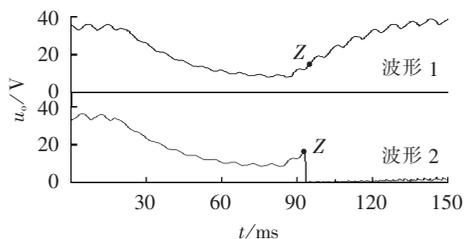


图 15 $45\%U_e-70\text{ms}$ 电压暂降下电子电路的 2 种输出电压波形

Fig.15 Two kinds of output voltage waveform of electronic circuit for $45\%U_e-70\text{ms}$ voltage-sag

电子电路随机输出波形 1(不动作波形)和波形 2(动作波形)。2 种波形在点 Z 之前的部分完全一样,波形 1 在点 Z 之后逐渐恢复至正常电压,电压值始终在 10 V 以上,电磁结构维持吸合状态,外部表现为低压脱扣器不动作;而波形 2 在点 Z 之后跌落至 0 附近,进入低压阶段,电压值低于 10 V,电磁结构进入释放-分离-吸合过程,低压脱扣器动作。

由此可知,低压脱扣器在模糊区域内动作与否,取决于电子电路的输出电压波形是动作波形还是不动作波形。

5.2.4 模态 4

以电压暂降持续时间为 30 ms 为例,该情形下的电子电路输出电压波形见图 16。图中,波形由上至下分别对应 $90\%U_e-30\text{ms}$ 、 $70\%U_e-30\text{ms}$ 、 $50\%U_e-30\text{ms}$ 、 $30\%U_e-30\text{ms}$ 、 $10\%U_e-30\text{ms}$ 电压暂降。

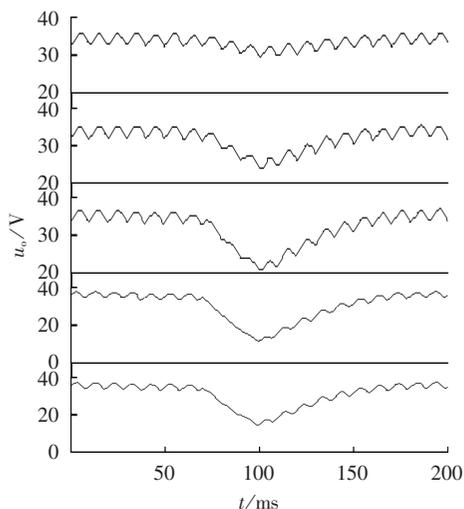


图 16 电压暂降持续时间为 30 ms 时电子电路输出电压波形

Fig.16 Output voltage waveforms of electronic circuit for 30 ms voltage-sag

由图 16 可见,电压暂降持续时间为 30 ms 时,电子电路输出电压波形都是由下降阶段和上升阶段组成。随着电压暂降幅值的减小,电子电路输出电压下跌坡度和深度都变大,但波形最低点电压始终大于 10 V,电磁结构维持吸合状态,低压脱扣器不动作。

5.2.5 模态 5

以电压暂降持续时间为 300 ms 时电子电路输出电压波形为例。电压暂降持续时间为 300 ms,当幅值从 $90\%U_e$ 变化至 $40\%U_e$ 时,低压脱扣器处于不动作区域,电子电路输出电压波形为不动作波形,变化规律同 5.2.4 节;当幅值从 $50\%U_e$ 变化至 $10\%U_e$ 时,电子电路输出电压波形为动作波形(见图 17,图中波形由上至下分别对应 $50\%U_e-300\text{ms}$ 、 $40\%U_e-300\text{ms}$ 、 $30\%U_e-300\text{ms}$ 、 $20\%U_e-300\text{ms}$ 、 $10\%U_e-300\text{ms}$ 电压暂降),其由下降阶段、低压阶段和高压阶段组成。随着电压暂降幅值减小,电子电路输出电压波形的下降阶段的下跌坡度和深度都变大。在低压阶段,电子电路输出电压持续小于 10 V,电磁结构进入释放-分离-吸合过程,低压脱扣器动作。

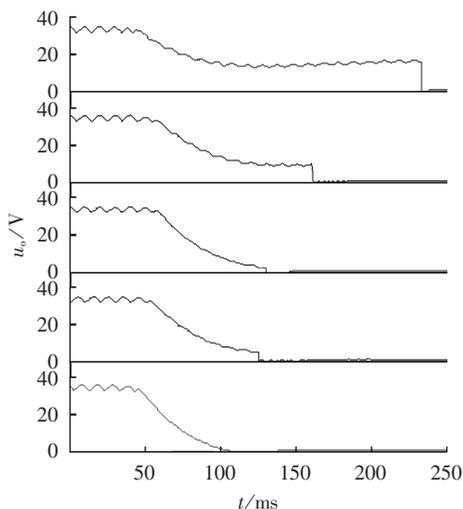


图 17 电压暂降持续时间为 300 ms 时电子电路输出电压波形

Fig.17 Output voltage waveforms of electronic circuit for 300 ms voltage-sag

5.2.6 模态 6

模态 6 下,电子电路的输出电压波形可参考图 6。此模态下,电子电路输出电压平稳波动,始终大于 10 V,电磁结构维持吸合状态,低压脱扣器不动作。

5.3 对照国标分析

a. 图 10 为低压脱扣器理论上的电压耐受曲线图,图 12 为 T 型低压脱扣器的实测电压耐受曲线图。两图都反映了低压脱扣器的动作情况,除了与输入电压幅值有关,与持续时间也有密切的关系。电子电路作为低压脱扣器的关键组成部分,其输出电压波形同样由输入电压幅值和持续时间共同决定,表 2 的模态划分和 5.2 节各种模态下电子电路的输出电压波形图可以充分说明这一点。GB 14048.1—2012 和 GB/T 22710—2008 标准仅给出了低压脱扣器及其电子控制器的动作电压阈值,显得较为粗略。因此,本文建议 GB 14048.1—2012 和 GB/T 22710—2008

中增加对于低压脱扣器及其电子控制器的输入电压暂降持续时间阈值的规定,起到更好的规范作用。

b. 由 5.1 和 5.2 节的分析可以看出,在由电压幅值和持续时间形成的二维面中,低压脱扣器的动作特性可划分为 3 个区域(不动作区域、模糊区域和动作区域),电子电路的工作状态可以划分为 6 个模态。根据 GB/T 17626.11—2008 给出的优先采用的电压暂降的试验等级和持续时间组合 $40\%U_e-200\text{ ms}$ 、 $70\%U_e-500\text{ ms}$ 、 $80\%U_e-5000\text{ ms}$,则完全无法反映低压脱扣器及其电子电路的动作特性的丰富信息。因此,本文建议 GB/T 17626.11—2008 标准增加推荐的电压暂降的试验等级和持续时间组合,更好地指导有关设备的电压暂降试验。

本文为此进行了一系列的初步探索,但应该认识到,针对某款设备的完整的电压暂降敏感性分析,远不是本文的工作所能完成的,还需要投入大量的资源进行长期严谨的试验、分析与凝练,这是国内非常缺乏的。

6 结论

(1)试验表明,低压脱扣器电子电路的输出电压波形呈现分阶段特征,主要包括 2 种情况:

a. 当发生电压暂降,低压脱扣器不动作时,电子电路输出电压波形为不动作波形,包含下降阶段和上升阶段 2 个阶段;

b. 当发生电压暂降,低压脱扣器动作时,电子电路输出电压波形为动作波形,包含下降阶段、低压阶段和高压阶段 3 个阶段。

(2)结合低压脱扣器的电压耐受曲线,电子电路的工作条件可有效分为 6 种模态,结合电磁结构动作特性,解释了低压脱扣器电压暂降作用下的动作机理。

a. 模态 2、4 下,电子电路输出电压波形为不动作波形,最低点电压高于电磁结构的临界动作电压,电磁结构维持吸合状态,低压脱扣器保持不动作。

b. 模态 1 下,电子电路的输出电压波形由电压暂降持续时间决定,持续时间小于 T_1 时,电子电路输出电压波形为不动作波形,电磁结构维持吸合状态,低压脱扣器保持不动作;持续时间大于 T_2 时,电子电路输出电压波形为动作波形,经历下降阶段、低压阶段和高压阶段,使电磁结构进入释放-分离-吸合过程,低压脱扣器会发生动作。

c. 模态 5 下,电子电路的输出电压波形由电压暂降幅值决定,幅值大于 U_2 时,电子电路输出电压波形为不动作波形,电磁结构维持吸合状态,低压脱扣器保持不动作;幅值小于 U_1 时,电子电路输出电压波形为动作波形,电磁结构进入释放-分离-吸合过程,低压脱扣器发生动作。随着电压暂降幅值减小,

电子电路输出电压下跌的坡度和深度都变大。

d. 模态 3 下,低压脱扣器处于模糊区域,相同幅值和持续时间的电压暂降下,电子电路随机输出 2 种不同电压波形,导致了低压脱扣器动作情况模糊不确定。

(3)在对本文试验结果深入分析的基础上,对 GB 14048.1—2012、GB/T 22710—2008 和 GB/T 17626.11—2008 标准提出了修订建议,建议 GB 14048.1—2012 和 GB/T 22710—2008 标准中增加对于低压脱扣器及其电子控制器的输入电压暂降持续时间阈值的规定,建议 GB/T 17626.11—2008 标准增加推荐的电压暂降的试验等级和持续时间组合。

参考文献:

- [1] 陈礼频,肖先勇,张文海. 考虑扰动源定位的电压暂降监测点最优配置[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):79-84,90.
CHEN Lipin,XIAO Xianyong,ZHANG Wenhai. Optimal allocation of voltage-sag monitors considering disturbance-source locating[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):79-84,90.
- [2] 杨达亮,卢子广,杭乃善. 新型单相电压暂降实时检测方法及其实现[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):110-113.
YANG Daliang,LU Ziguang,HANG Naishan. Method and realization of real-time single-phase voltage sag detection[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):110-113.
- [3] 赵泓,肖先勇,李政光,等. 敏感设备电压暂降失效率区间最大混合熵评估[J]. 电力自动化设备,2011,31(10):70-75.
ZHAO Hong,XIAO Xianyong,LI Zhengguang,et al. Estimation of maximum interval hybrid entropy of sensitive equipment failure rate due to voltage sag [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(10):70-75.
- [4] 袁晓冬,雷刚,顾文,等. 基于模糊逻辑的电压暂降能量指标[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):105-109.
YUAN Xiaodong,LEI Gang,GU Wen,et al. Energy index of voltage sag based on fuzzy logic[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(3):105-109.
- [5] 王玲,徐柏榆,王奕,等. 东莞地区负荷低压脱扣事故分析[J]. 广东电力,2013,26(2):30-32.
WANG Ling,XU Baiyu,WANG Yi,et al. Analysis on low voltage releasing accident of load in Dongguan district[J]. Guangdong Electric Power,2013,26(2):30-32.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 低压开关设备和控制设备 第 1 部分 总则:GB 14048.1—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [7] SHAREEF H,MARZUKI N,MOHAMED A,et al. Experimental investigation of AC contactor ride through capability during voltage sag[C]//9th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Prague,Czech Republic:IEEE,2010:325-328.
- [8] DJOKIC S Z,STOCKMAN K,MILANOVIC J V. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags short interruptions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1):494-505.
- [9] DJOKIC S Z,MILANOVIC J V,KIRSCHEN D S. Sensitivity of AC coil contactors to voltage sags short interruptions and under voltage transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(3):1299-1307.

- [10] HARDI S, DAUT I. Sensitivity of low voltage consumer equipment to voltage sag [C]//4th International Power Engineering and Optimization Conference. Shah Alam, Malaysia: IEEE, 2010: 328-328.
- [11] 于希娟, 李洪涛, 赵贺. 照明灯具对电压暂降敏感性研究[J]. 大功率变流技术, 2011(4): 22-25.
YU Xijuan, LI Hongtao, ZHAO He. Research on the impacts of voltage sag to lighting fixture[J]. High Power Converter Technology, 2011(4): 22-25.
- [12] 欧阳森, 刘平, 吴彤彤, 等. 低压脱扣器电压暂降敏感性试验研究[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 575-581.
OUYANG Sen, LIU Ping, WU Tongtong, et al. Experimental research on sensitivity of low voltage releaser to voltage sag [J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 575-581.
- [13] 薛毓强, 吴金龙. 基于分布参数磁路模型的永磁接触器吸力特性[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 222-228.
XUE Yuqiang, WU Jinlong. Study of attractive force characteristics based on magnetic distributed parameter circuit model of permanent magnet contactors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 222-228.
- [14] 向洪岗, 陈德桂, 李兴文, 等. 基于磁场和等效磁路的磁通变换器特性仿真和优化设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 85-91.
XIANG Honggang, CHEN Degui, LI Xingwen, et al. Characteristics emulation and optimization design of flux transfer trip based on magnetic field and equivalent reluctance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 85-91.
- [15] 廖才波, 阮江军, 刘超, 等. 油浸式变压器三维电磁-流体-温度场耦合分析方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 150-155.
LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, LIU Chao, et al. Comprehensive analysis of 3-D electromagnetic-fluid-thermal fields of oil-immersed transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 150-155.
- [16] 纽春萍, 董得龙, 孙昊, 等. 万能式断路器短时耐受电流的有限元分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 85-90.
NIU Chunping, DONG Delong, SUN Hao, et al. Optimal allocation of voltage-sag monitors considering disturbance-source locating [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 85-90.
- [17] 王永鑫. 低压断路器电磁脱扣特性的研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
WANG Yongxin. The study on the electromagnet characteristic of low-voltage circuit breaker[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [18] 张晋, 陈德桂, 付军. 瞬时低压脱扣器的三维磁场有限元分析与等效磁路[J]. 低压电器, 2000, 20(5): 7-11.
ZHANG Jin, CHEN Degui, FU Jun. 3D finite element analysis for instantaneous release and its equivalent magnetic circuit[J]. Low Voltage Apparatus, 2000, 20(5): 7-11.
- [19] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 低压断路器用电子式控制器: GB/T 22710—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电磁兼容试验和测量技术 电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验: GB/T 17626.11—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [21] 曾江, 欧阳森, 黄力鹏, 等. 一种三相电压暂降发生装置: 2014-204255999[P]. 2014-12-31.

作者简介:



欧阳森

欧阳森(1974—), 男, 广西钦州人, 副研究员, 博士, 研究方向为电能质量分析与控制、智能电器等(**E-mail**: ouyangs@scut.edu.cn);
李翔(1989—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制(**E-mail**: lxup@foxmail.com);

刘平(1991—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制;

刘丽媛(1993—), 女, 广东阳江人, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制、可靠性分析。

Experimental research on sensitive characteristic to voltage sag for electronic circuit of low-voltage release

OUYANG Sen, LI Xiang, LIU Ping, LIU Liyuan

(Key Laboratory of Clean Energy Technology of Guangdong Province, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The electromagnetic mechanism and its working states of low-voltage release are briefly analyzed, a test scheme is made and an experimental platform is designed based on a self-developed voltage-sag generator. An electronic circuit test of sensitive characteristic to voltage-sag is carried out for a 220 kV low-voltage release and its output voltage waveforms responding to different input voltage-sag signals are obtained. According to the voltage tolerance curve of low-voltage release, the working states of electronic circuit are divided into six modes: small amplitude, large amplitude, short duration, long duration, middle amplitude and duration, normal operation. The measured input and output voltage waveforms of the electronic circuit of low-voltage release as well as their impacts on its operation are analyzed for each mode. The analytical results show that, closely related to the amplitude and duration of the input voltage sag signals, the output voltage waveform of electronic circuit is characterized by its obvious stages, which decides the operating features of low-voltage release.

Key words: low-voltage release; electronic circuit; electromagnetic structure; sensitive characteristics to voltage sag