

区域电网电压暂降分析及评估方法研究

李 训¹ 许 可² 肖 丽²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司绵阳供电公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 首先介绍了电压暂降的概念以及造成电压暂降的原因, 并提出了敏感设备曲线的概念。根据绵阳某区域现场实测数据, 结合 PLECS 仿真分析造成该站点电压暂降的原因, 进而选择合理的缓解措施对该变电站改善后的电压暂降事件进行了预估计。最后, 讨论了电压暂降事件在敏感设备曲线上的分布情况, 给用户选择敏感设备提出了建议。

关键词: 电压暂降; 敏感设备曲线; 缓解措施

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)06-0041-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.06.010

Analysis of Voltage Sag in Regional Power Grid and Research on Its Evaluation Method

Li Xun¹, Xu Ke², Xiao Li²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Mianyang Electric Power Supply Company, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract: Firstly, the concept of voltage sag and the cause of voltage sag are introduced, and the concept of sensitive device curve is put forward. According to the measured data in a field of Mianyang, the causes of voltage sags caused by the site are analyzed by PLECS simulation, and the reasonable mitigation measures are selected to estimate the voltage sags after the improved substation. Finally, the distribution of voltage sag events on the sensitive device curve is discussed, and the suggestions are proposed for users to select sensitive devices.

Key words: voltage sag; sensitive equipment curve; mitigation measures

0 引言

随着电力系统、计算机的高速发展, 近年来, 国内外的学者越发认识到电能质量的重要性, 其中, 电压暂降问题所造成的影响在所有电能质量问题中最为严重。例如电压暂降会造成大型工业用户设备停运、误动作, 从而造成巨大的经济亏损^[1-2]。电压暂降不仅会造成巨大的经济损失, 还会造成人员的意外伤亡, 例如电梯运行故障、医疗故障等^[3]。因此, 研究电压暂降具有重要的理论价值和现实意义。文献[4]指出类别不同的电压暂降情况会由不同类型的短路故障造成。文献[5]指出可调速驱动器、双馈异步风力发电机等敏感设备的运行状态会受到

类别不同的电压暂降影响。文献[6]指出在寻找故障点、检查敏感设备工作状态时, 进行必要的电压暂降记录的作用。文献[7]指出静止同步补偿器对于电压暂降造成的影响可以随着电压暂降程度进行一定的补偿。

针对电压暂降的问题, 国内外学者主要从幅值、持续时间和相位跳变 3 个特征量展开大量研究, 但在方案设计中, 若未能将暂降幅值、持续时间、电压相位、相位跳变、相位不对称、暂降幅值不对称、波形畸变与暂态等特征量进行描述^[5], 则难以准确评估电压暂降的影响。因此, 除了对电压暂降基本的特征量进行准确描述, 还需对暂降区段其余的特征量进行全面准确描述^[8]。

如何缓解电压暂降问题并采取有效的措施是一

个难点。为了解决这些问题,下面以绵阳区域电网某 220 kV 配电系统为例,建立了仿真模型。通过与现场实测数据进行对比,分析了该区域电压暂降的原因,提出了相应的缓解措施,对改善后的效果进行预估计,利用仿真结果在敏感设备曲线上绘图,研究各类设备的敏感性以达到对该区域的电压暂降评估分析的目的。

1 电压暂降的相关理论

1.1 电压暂降的概念

电压暂降时间是指在很短的时间内,系统供电的电压有效值的跌落现象。电压暂降的重要指标包括暂降的持续时间、在跌落过程中幅值的变化、暂降前后电压的相位变化。1) 在整个暂降的过程中,定义跌落电压有效值与额定电压有效值的比值为电压暂降的幅值。2) 电压暂降持续时间即电压暂降起止时刻的差值^[9-16]。电压暂降的持续时间范围一般在 0.5 ~ 1 min 之间。3) 电压暂降的相角跳变即电压暂降前后相位角的变化大小^[17-18]。此外,暂降频次也是表征电压暂降的重要指标。必须将电压暂降持续过程的时间、电压暂降发生的频率以及暂降幅值大小等因素一同整体考虑。

1.2 电压暂降的产生原因

在电能的输送和分配的系统中,引起电压暂降问题的主要原因有^[19]:大型异步电动机驱动、雷电、通断动作、线路短路^[20]。其他原因包括:多个串、并联的电容器组、变压器组的使用等。

1.2.1 大型异步电机驱动带来的电压暂降

异步电动机及各局部电网的容量都会影响电压暂降的程度。作为电网中的主要负荷,感应电动机占据的用电量超过 60%,而过大的异步电动机的驱动电流(通常是额定电流的 5 ~ 6 倍)会造成持续时间较长、幅值超过 0.85 p. u. 的电压暂降。但是用户却不会受到很大的影响^[21]。

1.2.2 变压器投切造成的电压暂降

由于铁心的非线性,引起电压暂降的原因归结为空载变压器投切时产生很大的磁化电流^[9, 22]。因为不同的三相变压器饱和程度不同,所以电压暂降在每一相的幅值大小也不同。电压暂降幅值与铁心中的剩磁和网络阻尼、电源强度、开关合闸时刻等因素有关。通常,由变压器投切造成的电压暂降在

85% 以上^[9, 20, 23]。

1.2.3 短路故障造成的电压暂降

通常单相、两相、三相的接地短路故障涵盖了输配电线路的故障类别。对于三相短路故障而言^[24],会引起对称的电压暂降。但是对于不对称故障,各相电压幅值、相角跳变不相同。当系统发生了短路故障时,各母线会发生不同程度的电压暂降,暂降程度和故障点间的距离长短相关,甚至邻线用户将再经受一次电压暂降。而单相短路故障在各种电力系统的短路故障中发生的可能性最大^[9, 23, 24]。各种敏感设备也会因此跳闸甚至产生误动作。而三相短路故障虽然发生的可能性很小,但是其危害极其严重。

电压暂降的严重程度主要由以下条件制约:各网络节点和故障点的远近、各种变压器组的事故发生位置、连接方式、故障点周围有无电源、整个线路的阻抗情况、电压暂降前后故障点的电压情况、断路器通断的快慢、保险丝的熔断时间长短、各变压器组的失效率,还有系统规定的自动重合闸的重置次数等。

1.3 ITIC(信息技术工业协会)曲线

敏感设备的敏感程度与电压暂降的影响密切相关。不同的用电设备或负荷对于同一电压暂降的耐受程度不同,因此不同的设备应当采用不同的敏感曲线。不同的敏感曲线由制造业的垄断联盟所规定,各大公司常采用的曲线有:ITIC 曲线、SEMIF47 曲线、接触器类设备敏感曲线、变频驱动类设备敏感曲线^[12, 25]。

ITIC 曲线最早在 1980 年由美国的敏感设备生产组织提出。为了预防计算机等敏感设备受到电能质量问题的影响,ITIC 曲线用于直观地描述计算机设备承受电力系统的电压变化持续时间和幅值的能力,而最早的 ITIC 曲线绘制参考了大量的实验数据、计算机的记录等。对于其他敏感设备曲线,可参照 ITIC 曲线并视实际情况制定^[26, 27]。

ITIC 电压容限曲线的横坐标同时标示了系统的周波(c)单位和时间(s、ms、 μ s)单位^[10],该曲线是目前暂态电能质量事件评估的重要依据,如图 1 所示。获取设备敏感曲线最简单的方法是通过试验或评估的方法得到,也可以向设备制造商索取^[10, 28]。

电压暂降发生的次数与敏感设备运行之间的联系可以由记录的电压暂降的幅值、持续时间长短等特征绘成敏感曲线,从而很直观地反映出来。

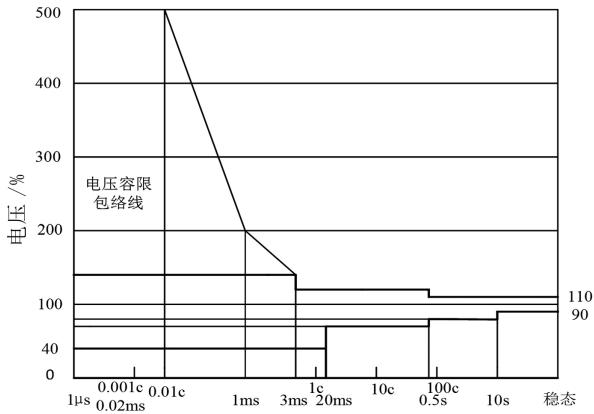


图 1 ITIC 电压容限曲线

1.4 蒙特卡洛故障概率估计

蒙特卡洛法是在数学概率的模型基础上,通过统计学得出所需参数的近似解。蒙特卡洛法适用于非常复杂的系统,对于解决随机性问题有着良好的效果。

在电压暂降的短路故障中,蒙特卡洛法首先需要故障进行概率描述,即对 A、B、C 三相短路情况加以描述,例如单相、两相、三相的短路情况并加以组合;然后从现实概率分布抽样,即借助随机序列的思想对构造的故障抽样;最后建立各种估计量,从而得到问题的解。随机数 i 的概率模型用式(1)表示。

$$F_T = \begin{cases} 1 & i < P_{3L} \\ 2 & P_{3L} \leq i < P_{3L} + P_{AB} \\ \dots \\ 10 & P_{3L} + P_{AB} + \dots + P_{BG} \leq i \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{3L} 、 P_{AB} 、 P_{BG} 分别为各种故障发生的概率; i 在 (0, 1) 上服从均匀分布。

设 L_i 为第 i 条线路的总长度, m 为线路数,整个系统中第 i 条线路发生的故障概率为^[4]

$$P_i = \frac{L_i}{\sum_{i=1}^m L_i} \quad (i = 1 \sim m) \quad (2)$$

随机数 j 的概率模型用式(3)表示。

$$F_L = \begin{cases} 1 & j < P_1 \\ 2 & P_1 \leq j < P_1 + P_2 \\ \dots \\ m & P_1 + P_2 + \dots + P_{m-1} \leq j \end{cases} \quad (3)$$

式中: 变量 j 在 (0, 1) 上服从均匀分布; P_m 为整个系统中第 m 条线路发生故障的概率。

可以将线路故障看作服从均匀概率分布,整个系统中线路发生故障的概率为^[24]

$$P_{\text{uniform}} = \frac{1}{m} \quad (4)$$

式(5)表示在不同概率下随机数 j 的故障类型^[24]。

$$F_L = \begin{cases} 1 & j < P_{\text{uniform}} \\ 2 & P_{\text{uniform}} \leq j < 2P_{\text{uniform}} \\ \dots \\ m & (m-1)P_{\text{uniform}} \leq j \end{cases} \quad (5)$$

实际线路长度大于 10 km 时,可将整个线路分割为多个 10 km 的小线路段,即在式(4)中增加线路数,同时将该条线路中几个点看作是故障点进行计算^[24]。

2 某区域电网敏感负荷电压暂降监测与仿真分析

下面以绵阳某 220 kV 变电站为例进行介绍,其他站点分析类似。该变电站的用户为某研究院,系统变电站的线路中包含 1 个 220 kV 变电站和 2 个 110 kV 站。其中,各边电压暂降监测点部署方案为系统侧安装数量为 1 台,用户侧安装数量为 3 台,无线模块数量为 2 个。

监测线路选择在该变电站 10 kV 母线 I 段和 10 kV 母线 II 段。电压暂降仪安装于两段母线电压的端子排上。该变电站一次接线如图 2 所示。

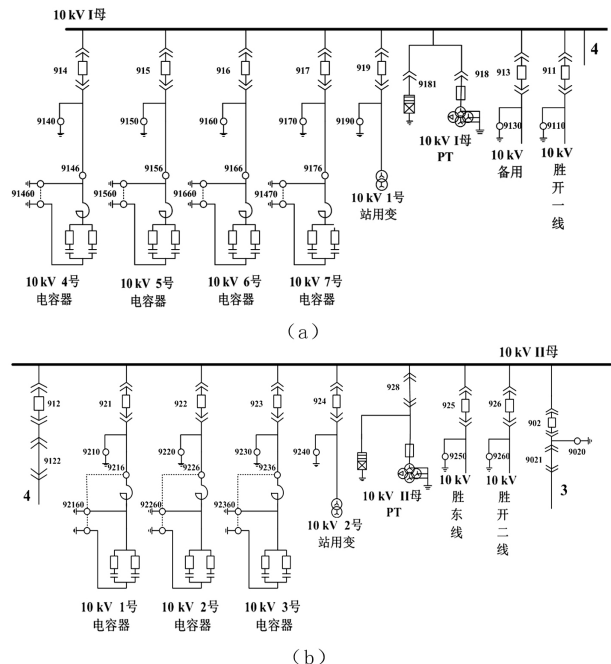
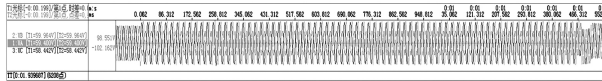


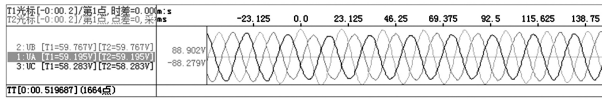
图 2 某 220 kV 变电站一次接线

在 10 kV I 母观察电压暂降发生情况,将仿真测试与现场测试记录进行对比,来探讨电压暂降问题。

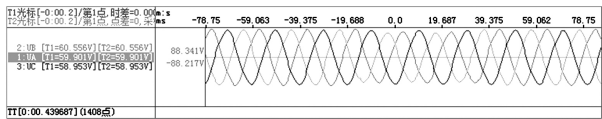
图 3 为 10 kV I 母监测点在不同电压暂降事件下对应时段的监测电压波形。



(a) 2017-12-27 06:07:50.150,
特征幅值 65%, 持续时间 1530ms



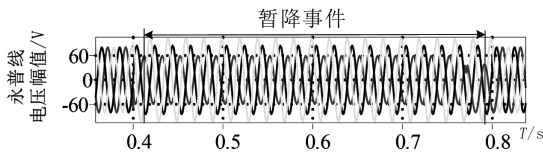
(b) 2017-12-29 00:44:54.001,
特征幅值 89%, 持续时间 90ms



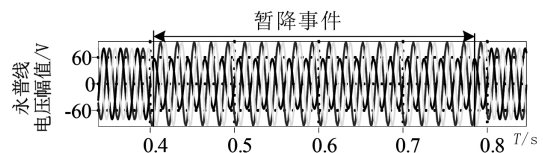
(c) 2018-01-03 06:52:23.753,
特征幅值 88%, 持续时间 30ms

图 3 10 kV I 母电压暂降记录波形

图 4 为按照 220 kV 变电站的一次接线图在 PLECS 环境下模拟相应 10 kV I 母电压发生暂降的仿真波形。



(a)



(b)

图 4 10 kV I 母发生电压暂降的仿真波形

可以看出,电压暂降深度约为 20%,持续时间约为 2~15 个周波,根据仿真分析及监测数据可总结出短路故障引发电压暂降的典型特征如下:

1) 电压暂降发生后恢复过程迅速,基波电压有效值变化过程大致呈矩形;在整个故障期间,可能出现多次暂降;电压暂降幅值在突变点之间基本保持不变,而只在开始与结束瞬间发生了突变^[13-22]。

2) 不同类型的短路故障会导致不同程度的三相电压暂降。三相对称短路故障会造成各相电压暂降同时开始,并且每相暂降幅值相等;其他类型的短路故障造成的电压暂降有时还伴随有电压暂升现象,并且三相幅值不相等。

3) 电压暂降幅值一般不大于 0.7 p. u.,暂降持续时间与开启保护动作的时间相关。

上述典型特征与仿真模型的结果相符,验证了理论分析的结果。

3 电压暂降改善方案与评估结果

3.1 电压暂降的缓解措施

目前抑制电压暂降的方法主要是在电力系统与用户设备之间的接口处加装补偿装置,通过注入有功功率和无功功率来对系统的有功功率和无功进行补偿。常见的补偿装置有:动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)、不间断电源(uninterrupted power supply, UPS)、固态切换开关(solid state transfer switch, SSTS)、磁谐振变压器等。

其中,UPS 可以起到抑制电压暂降、电压中断的作用。当供电系统发生电压暂降故障时,转换开关会自行转换至 UPS 进行供电,从而抑制了电压暂降的影响。在实际的应用中,UPS 的电池容量决定了其保护时间,一般的 UPS 电池容量为 1 kW~1 MW。

DVR 可以对电压暂降故障在短时间内进行补偿,对提高大型综合工业敏感设备的供电质量效果显著。SSTS 用于串联在电压敏感负荷和主、备用电源之间。当电压暂降故障发生时,SSTS 的切换指令由控制系统发出,此时敏感负荷自动切换至备用电源,从而抑制了电压暂降的影响^[30]。SSTS 适用于高压、中压和低压系统的电压暂降以及长期过电压和低电压的情况^[30-31]。

由于 UPS 的高昂售价,而 SSTS 以及磁谐振变压器仅能在部分的电压暂降幅值区段起到缓解作用,因此选用 DVR 对电压暂降问题进行缓解。

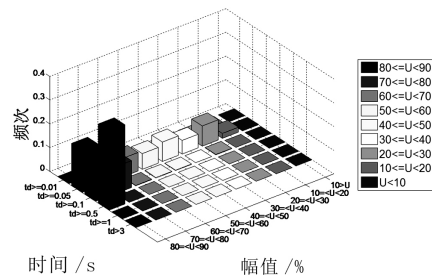


图 5 10 kV I 母线经过改善后电压暂降三维分布^[12]

图 5 对加装 DVR 之后在最大运行方式下的电压暂降幅值和时间分布情况进行了量化评估。可以看出,在最大运行方式下暂降事件发生在 0.05~0.1 s

的频次较为集中;电压幅值为80%~90%的暂降事件频次也很集中;因此,需要对该变电站发生电压少量、长时间的暂降情况加以治理。

3.2 电压暂降事件在敏感区线上的分布

根据第2节所得到的仿真结果可以将电压暂降幅值与持续时间在敏感曲线上描点绘制分布图,以便直观地显示出敏感设备曲线与电压暂降频次的关系。图6至图9结合不同的敏感设备耐受曲线(包括ITIC曲线、SEMIF 47曲线、接触器类设备典型敏感曲线),分别形成了635次暂降事件在不同耐受曲线上的分布情况。在635次电压暂降事件中,IT-IC曲线反映的事件次数达到了218次,占整个事件的34.33%;SEMIF 47曲线反映的事件次数达到了298次,占整个事件的46.93%;接触器类设备典型敏感曲线反映的事件次数达到了501次,占整个事件的78.89%;变频驱动类设备典型敏感曲线反映的事件次数达到了0次,占整个事件的0%。

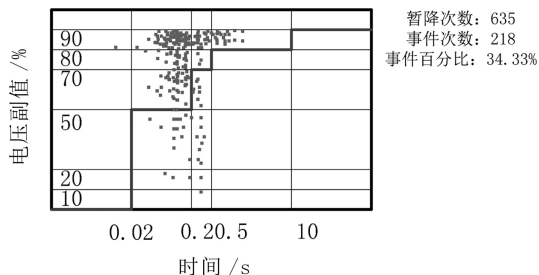


图6 ITIC曲线

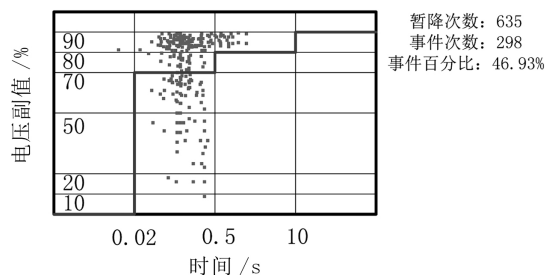


图7 SEMIF 47曲线

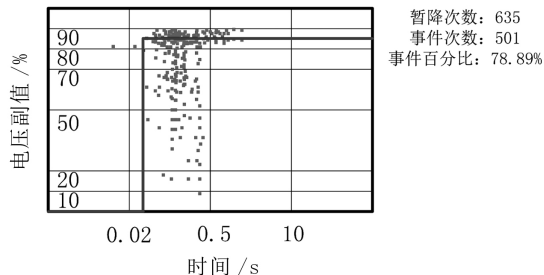


图8 接触器类设备典型敏感曲线

若设备对电压质量要求没有那么高,发生电压

暂降事件的次数就越少,则事件发生率也越低^[12],如图8所示的接触器类设备。因此用户在选择敏感设备时,该设备需要对电压暂降具备一定抗干扰的能力。

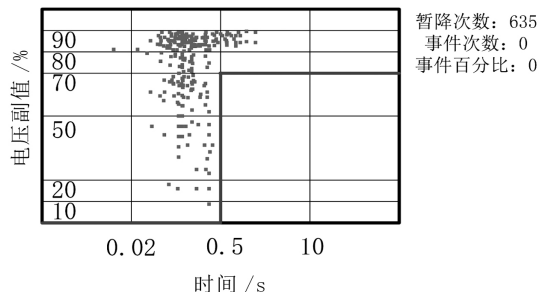


图9 变频驱动类设备典型敏感曲线

除此之外,在各个系统的运行方式中,电压暂降对于不同的敏感设备的影响不同。尤其当暂降次数超过一定的限值时,对于敏感设备的要求变得更高了,要求其必须能承受更高密度的暂降,而不具备这种要求的设备应少投入使用,如图9所示的变频驱动类设备。

4 结 语

前面从绵阳某区域电网的电压暂降实际问题出发,以绵阳地区某220 kV变电站为例,首先建立了该变电站的电路模型,对电压暂降事件进行了深入研究,并结合现场数据实测分析得出电压暂降事件的发生原因。进而对于电压暂降问题提出了缓解方案,对该变电站改善后的电压暂降事件进行了预估计。最后,讨论了敏感设备曲线上电压暂降事件的分布情况,为用户选择敏感设备提出了建议。

参考文献

- [1] 韩英铎,黄民聪.信息电力与FACTS及DFACTS技术[J].电力系统自动化,2000,24(19):1-7.
- [2] 徐永海,陶顺,肖湘宁.电网中电压暂降和短时间中断[M].北京:中国电力出版社,2015.
- [3] 程浩忠.电能质量概论[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [4] B. Sawir, M. R. Ghani, A. A. Zin, et al. Voltage Sag: Malaysian's Experience [C]. International Conference on Power System Technology, Proceedings, Powercon, 1998 (2): 1421-1425.
- [5] 孔祥雨.电压暂降特性及其对敏感设备影响评估研究[D].北京:华北电力大学,2014.

[6] 徐文远, 雍静. 电力扰动数据分析学——电能质量监测数据的新应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 93-101.

[7] 黄小庆, 曹阳, 吴卫良, 等. 考虑电压暂降指标的电压协调控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 147-154.

[8] M. F. Alves, T. N. Ribeiro. Voltage Sag: An Overview of IEC and IEEE Standards and Application Criteria[C]. Transmission and Distribution Conference, 1999(2): 585-589.

[9] 刘云潺. 电压暂降检测方法的分析与研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.

[10] 常学飞. 电力系统故障引起的电压暂降分析方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.

[11] 吕伟. 基于凹陷域分析的电压暂降监测点优化配置研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.

[12] 陈瑞. 电压暂降在配电网中的传播规律及仿真评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.

[13] 魏荣进. 电压暂降检测与扰动源辨识方法的分析与研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.

[14] 高琳. 电压骤降评估方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.

[15] 赵贤. 电压闪变和暂降对电能计量的影响[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.

[16] 王效孟. 电压暂降在线检测装置的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.

[17] M. H. J. Bollen. Characterisation of Voltage Sags Experienced by Three-phase Adjustable-speed Drives[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(4): 1666-1671.

[18] Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems: BS EN 50160[S], 2010.

[19] N. G. Hingorani. Introducing Custom Power[J]. IEEE Spectrum, 1995, 32(6): 41-48.

[20] 王金丽, 盛万兴, 宋祺鹏, 等. 配电网电能质量智能监控与治理仿真[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 515-519.

[21] 何维国, 董瑞安, 张孝银, 等. 配电网中电压暂降源定位方法比较[J]. 电测与仪表, 2011, 48(8): 53-58.

[22] 刘应梅, 白晓民, 王文平, 等. 基于 Dyn 测度的电压暂降检测方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 45-49.

[23] 任伟. 交-直-交变频调速系统仿真研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.

[24] 易杨, 张尧, 钟庆. 基于蒙特卡罗方法的大型电力用户电压暂降评估[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 57-60.

[25] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[26] 王玲, 高倩倩, 陶顺, 等. 基于暂降类型判断的短路故障类型识别研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(6): 8-13.

[27] 奚珣. 电能质量的更高要求及对策[J]. 供用电, 2002, 19(1): 40-41.

[28] D. J. Won, S. J. Ahn, S. I. Moon. A Modified Sag Characterization Using Voltage Tolerance Curve for Power Quality Diagnosis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4): 2638-2643.

[29] 刘伟波. 固态开关关键技术仿真研究[J]. 市场周刊(理论研究), 2013(3): 142-144.

[30] 陈众励, 许维胜. 电压中断与电压暂降的成因及其防治[J]. 电工技术学报, 2015(51): 518-520.

[31] Z. Wang, S. Wang, J. Qiu, et al. Induced Voltage Analysis of Superconducting Fault Current Limiter[J]. Compel International Journal for Computation & Mathematics in Electrical & Electronic Engineering, 2014, 33(1/2): 38-46.

作者简介:

李 训 (1975), 工程师, 主要从事电网电压及谐波管理工作;

许 可 (1981), 高级工程师, 主要从事变电运行及配电网管理工作;

肖 丽 (1977), 高级经济师, 主要从事电压管理工作。

(收稿日期: 2018-09-28)

=====
(上接第 31 页)

[11] 周凯, 陶文彪, 赵威, 等. 以分子取向理论理解交联聚乙烯中水树在不同温度下的生长特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3665-3673.

[12] 黄明, 周凯, 杨滴, 等. 在线注入有机硅修复液对交联聚乙烯电缆中水树生长的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 176-182.

[13] Abderrazzaq M H. Development of Water Tree Structure in Polyester Resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(1): 158-165.

[14] Wang Z, Marcolongo P, Lemberg J A, et al. Mechanical Fatigue as A Mechanism of Water Tree Propagation in

TR-XLPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 321-330.

[15] A. Thomas, T. Saha. A New Dielectric Response Model for Water Tree Degraded XLPE Insulation - Part A: Model Development with Small Sample Verification[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2008, 15(4): 1131-1143.

作者简介:

冯 杰 (1984), 硕士、高级工程师, 从事电力物资检测和研究工作;

李康乐 (1990), 博士, 研究方向为高电压与绝缘技术。

(收稿日期: 2018-07-25)