

城市电网电压暂降仿真研究及影响分析

随着电力用户对用电要求的不断提高,电能质量尤其是电压暂降问题受到越来越多的关注。结合某城市电网的实际情况和各项指标,在电磁暂态仿真软件PSCAD中对暂降集中与投诉集中地区的电压暂降问题进行了仿真分析。典型故障时的仿真结果与电力公司电能质量实测数据的良好吻合,有效验证了模型的准确性。同时,根据用户投诉情况对各类故障进行了仿真分析,得到了不同位置以及不同类型故障对用户侧的影响及其规律。研究结果有针对性地解决了用户电压暂降问题,并为此提供了理论依据和实践指导。

方 祺/上海市电力公司青浦供电公司

段若晨 王丰华 张 君/上海交通大学电气工程系



方 祺/助理工程师

随着经济的不断发展和高新技术企业的不断增多,在保证供电安全性和可靠性的同时,对供电质量提出了越来越高的要求。除了传统的谐波、电压偏差、频率偏差、电压波动和闪变等电能质量问题之外,用户对电压暂降的要求也日益提高,这也是用户投诉最多的电能质量问题。电压暂降可能造成生产线上电动机停机、变频器失电压保护误动作、可编程序逻辑控制器失灵、接触器脱扣以及计算机存储数据丢失等现象,给用户带来巨大的经济损失^[1-3]。

电压暂降是供电电压有效值在短时间内突然下降的事件,其持续的时间一般为0.5~30个周波。供电中断是电压暂降的一个特殊情况,指供电电压的有效值低至零左右。暂降深度、持续时间和相位跳变是电压暂降的三大指标。对于电压暂降的评价指标,国际上尚无统一的标准定义,其中有代表性的包括国际电工委员会(IEC)标准和电气与电子工程师协会(IEEE)标准。IEC定义电压

暂降为下降到额定值的1%~90%,电压下降到小于1%为供电中断;持续时间小于3 min为短时中断。IEEE定义电压暂降为下降到额定值的10%~90%,电压下降小于10%为供电中断;持续时间小于1 min为短时中断^[4-5]。

目前国内外针对电压暂降原因及影响的研究较多。文献[6-7]对暂降源定位的几种常用方法进行了介绍,并利用三点法分析了上、下游参数变化与电压变化之间的关系,由此定义了上、下游造成电压暂降的权重系数,从而定量地给出电压暂降源定位结果。文献[8]分析了电压暂降发生的原因,并通过仿真分析了不同位置暂降对用户的影响程度。文献[9]通过ATP仿真软件编写了短路计算程序和电磁暂态程序,从而总结出电压暂降的特性和系统受到的影响。到目前为止,尚未有针对多节点、多系统的大电网系统的电压暂降分析与研究。此外,现有文献中的仿真模型大多采用IEEE标准节点模型,或仅仅针对十几个节点区域电网进行仿真^[10],所得到的分析结果在大规模电网上的应用尚有待斟酌。有的供电局为了较好地掌握所管辖电网的电能质量问题,已经或逐步开始建立适合于所管辖电网的电能质量监测系统,但是由于受制于各种条件,尚无法建立起覆盖全网的监测系统。而通过建模仿真的办法可以有效消除这些盲区,实现对任意节点的监测。因此,对于动辄上百甚至上千节点的现代大规模电网来说,建立既全面又准确的仿真平台势在必行。

关键词/Keywords

电压暂降 ·
仿真模型 ·
PSCAD ·
用户影响 ·

本文以某实际城市电网为雏形，针对现有的电压暂降情况，首先利用PSCAD软件搭建该城市电网的全网仿真模型，并将仿真结果与监测到的实际数据进行比对，以验证模型的准确性。进而通过设置故障点，模拟实际电压暂降情况，得到不同位置、不同故障类型对用户侧电压波形所造成的影响。分析结果可与实测数据互为补充，以期及时发现潜在的电能质量问题，确保电网及设备的安全稳定运行。

研究对象简介

本文仿真研究对象为一特大型城市电网，其最高供电负荷为2 940万kW。截至2013年底，拥有35 kV及以上变电站941座，输电线路24 170 km。对于如此庞大而又复杂的电网，如何实现电能的安全稳定输送成为首要任务，而其中关注最多也最难以解决的当属电能质量问题。

暂态电能质量问题，尤其是电压跌落问题因其造成的损失大、发生远而停电事故频繁以及过程短暂而难以分析等原因，已成为影响用户尤其是高新技术企业安全正常生产的重要原因。电力用户尤其是高精尖产业用户对于电能质量问题特别关注，其投诉量占到年投诉量的95%以上。以2013年为例，全网全年共发生电压暂降3 024次、供电中断508次，其中10 kV母线侧暂降1 584次、中断327次，110 kV母线侧暂降1 440次、中断171次，220 kV母线侧暂降0次、中断10次，这些暂降多次引起用户投诉，部分情况如表1所示。

表1 2013~2014年电力用户投诉情况

时间	线路	站点	事件
2013-3-18 16:40	67#~69#	69#	电网波动
2013-4-19 12:20	67#~69#	69#	输电线路闪络
2013-6-15 22:00	22#~104#	104#	22站F26跳闸
2013-7-24 4:15	22#~104#	104#	22线电压突降
2013-9-23 5:20	22#~104#	104#	22线故障接地
2013-11-4 3:00	22#~104#	104#	104线电压闪降
2013-12-10 16:05	105#~108#	108#	闪跳及停电
2014-4-10 14:25	22#~104#	104#	电能质量问题引起设备停电

将2013年全年的暂降数据进行汇总，其电压

残压、持续时间及发生频率如图1所示。由图可见，电压暂降持续时间一般都在零点几秒，并且暂降幅值在持续时间较短时较小，时间略长时普遍偏大。因此，对故障录波设备提出了很高的要求，电压暂降问题的分析将会非常复杂，而巧妙地利用仿真软件可以不受设备准确度的影响。

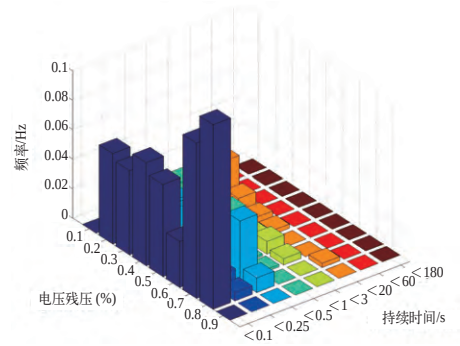


图1 2013年全网暂降事件统计

电网模型的PSCAD实现

根据实际电网的网架结构及每个站点的监测数据，需要在PSCAD仿真软件中搭建相应的电网各部分模块，即发电机模块、变压器模块、线路模块、负荷模块、控制模块及故障模块等六大部分。各部分模块简要描述如下。

1. 发电机模块

发电机模块系统结构如图2所示，其中包含同步发电机、直流励磁机、电力系统稳定器、分布比较器以及其他控制元件。主要通过调节同步发

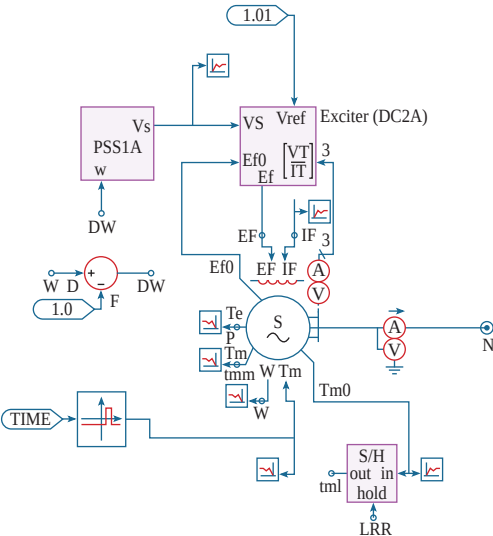


图2 发电机模型示意图

电机中的电压、频率和容量等参数，以实现同实际数据保持一致。

2. 变压器模块

由于电网中变压器全部采用Y0/D或Y0/Y0/D联结，故可通过设置变压器绕组接线方式以及一、二次电压和容量等参数建立相应的三相变压器模型。其中，发电厂出口变压器电压等级为24/550 kV，电网中变压器电压等级为550/230 kV、230/115 kV和115/10.5 kV。在一些中心主站还需要对本区域内负荷进行供电，采用电压等级为230/115/10.5 kV的三绕组变压器，如图3所示。

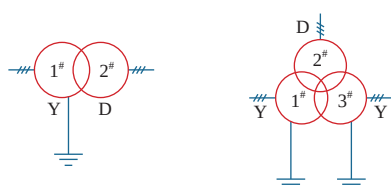


图3 双绕组、三绕组变压器模型

3. 线路模块

电网主网结构包括500 kV、220 kV及110 kV输电线路。输电线路模型采用PSCAD自带的T-Line模型，同时各参数（如电阻、电感和电容等）与运行部门提供的实际线路值逐一对应，如图4a所示。



图4 线路模型及负荷模型示意图

4. 负荷模块

电力系统的负荷建模一直是电力系统仿真建模中的难题。由于实际电网中负荷类型复杂繁多，对每一个负荷进行模型搭建显然不可能实现。而针对各类线性、非线性负荷，采用的数学等效方法也不尽相同。由于缺乏对用户负荷类型的全面统计资料，因此只能通过监测负荷侧母线功率流动以及有功功率、无功功率大小及方向，建立恒功率负荷模型，如图4b所示。以使电网中的功率流动同实际情况保持一致。

5. 其他模块

在模型的每条母线侧加装三相断路器和万用表。断路器除了能够控制线路开断外，更重要的

是可以实时监测电网中的功率流动情况，为验证模型准确性及分析结果提供依据；万用表则可以实时监测各节点电压、电流瞬时值和有效值以及功率流动情况，也可以监测各相相角变化，如图5a所示。

由于需要对仿真模型设置典型故障，以分析发生暂降故障时电压波动情况，故搭建短路故障模块，此模块可以模拟单相接地短路、两相接地短路、两相短路及三相短路四大类故障，基本覆盖了由各类故障造成电压暂降的情况，如图5b所示。

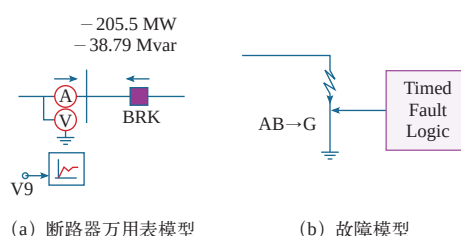


图5 断路器、万用表及故障模型示意图

根据上述模块并结合实际电网接线图，搭建全网的仿真模型，为后续研究提供研究平台。

仿真模型验证

1. 正常运行时仿真结果

为了验证模型的准确性和等效性，可将仿真结果与实测数据相比较。首先可以观察各个节点电压情况是否与实际母线电压一致，每条线路的功率流动是否与实际功率流向、大小一致；然后选取部分节点和线路进行对比，结果如表2、表3所示。

表2 部分节点电压情况比较

节点	实测电压/kV	仿真电压/kV	偏差 (%)
电厂500 kV侧	551.2	500.1	0.19
1站220 kV侧	230.8	230.1	0.30
2站220 kV侧	229.7	230.0	0.13
3站110 kV侧	115.2	114.5	0.60
4站110 kV侧	115.5	114.7	0.69
5站10 kV侧	10.5	10.3	1.90

通过对比可以发现，电压偏差控制在2%以内，功率偏差控制在5%以内，仿真结果基本同实际电网情况保持一致。

表3 部分线路功率流动情况比较

线路	有功功率			无功功率		
	实测值 /MW	仿真值 /MW	偏差 (%)	实测值/ Mvar	仿真值/ Mvar	偏差 (%)
1	3012	2806	6.84	483.9	467.7	3.35
2	183.6	178.4	2.83	27.0	25.7	4.81
3	538.2	549.7	2.14	92.8	91.6	1.29
4	215.3	221.7	2.97	9.9	10.2	3.03
5	286.9	270.6	5.68	62.1	61.5	0.97

2. 典型故障时仿真结果

选取某变电站的10 kV母线侧作为观测点，分别对单相接地短路、两相接地短路及三相短路故障进行仿真分析。考虑电压稳定时间等因素，将模型中起始时间延后0.2 s进行仿真，结果如图6~图8所示。由图可见，仿真波形与实际波形能够较好的契合。除实际电网刚进入暂态时会产生大量谐波外，电压暂降的变化规律及幅度基本保持一致。

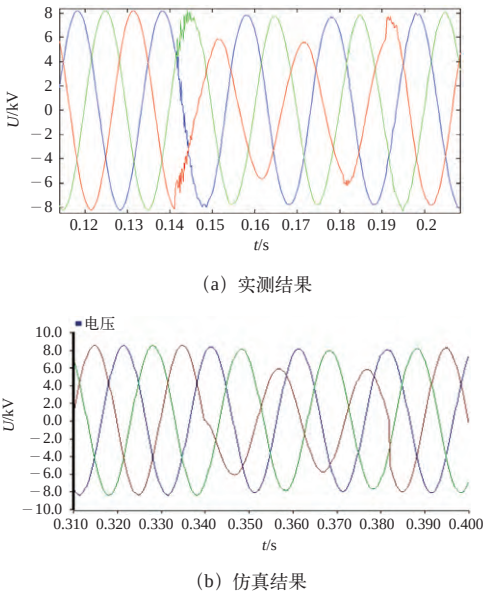
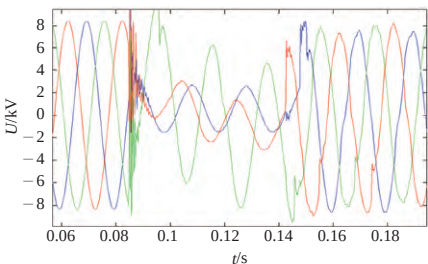


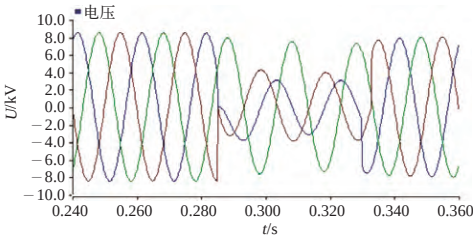
图6 10 kV侧C相接地短路故障

暂降故障对负荷侧电压的影响

当输电系统中发生故障时，用户侧（10 kV）母线将承受电压暂降。由于监测点通常安装于特定母线上，即使母线到故障点的电气距离很远，仍能受到暂降影响^[11]。因此可以通过仿真模型，人为设置故障点，模拟这些地区的电压暂降情况，

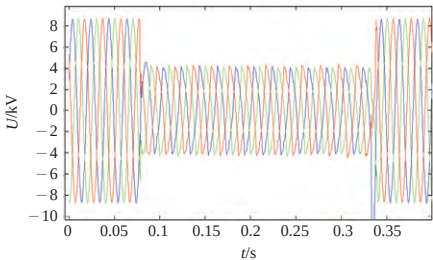


(a) 实测结果

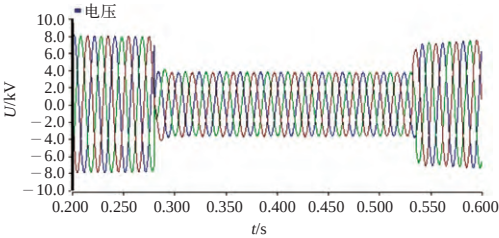


(b) 仿真结果

图7 10 kV侧AC两相接地短路故障



(a) 实测结果



(b) 仿真结果

图8 10 kV母线侧ABC三相短路故障

从而找到不同位置、不同类型故障对于负荷侧电压的影响。

以发生频率最高的单相接地故障为例，选取了用户投诉较多同时暂降发生较为频繁的负荷侧作为研究对象，即监测点位于某一终端变电站10 kV母线侧。同时分别在终端站10 kV侧、220 kV侧以及上游线路两个变电站的220 kV侧（与末端变电站之间仅通过输电线路连接且距离逐渐增大）设置A相接地短路故障。由于终端变电站采用Y/D变压器联结，故通过对比变压器两侧故障波形，

可以得到变压器联结组别对于暂降信号传递的影响。同时由于上游两个变电站220 kV母线与终端站负荷侧的距离逐渐增大,因此在这些位置设置故障可以分析输电线路电气距离对负荷侧电压波形的影响。设置故障开始时间为0.3 s,持续时间为0.1 s,各工况下负荷侧电压波形如图9~图12所示。

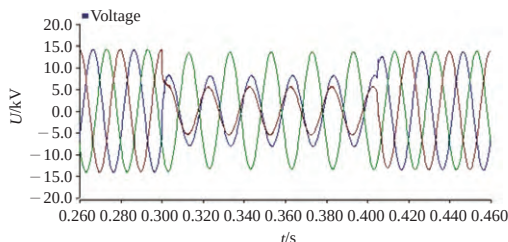


图9 终端站10 kV侧发生A相接地短路故障

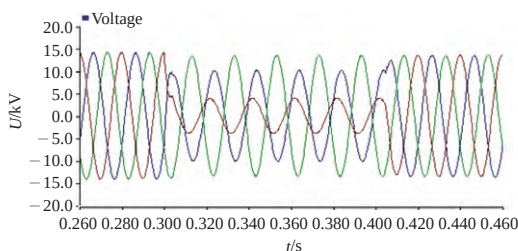


图10 终端站220 kV侧发生A相接地短路故障

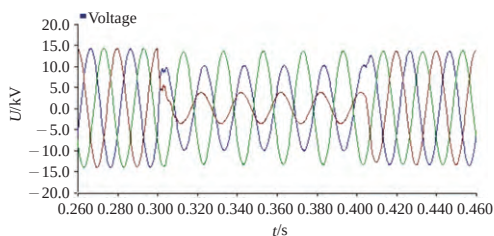


图11 上游近端站220 kV侧发生A相接地短路故障

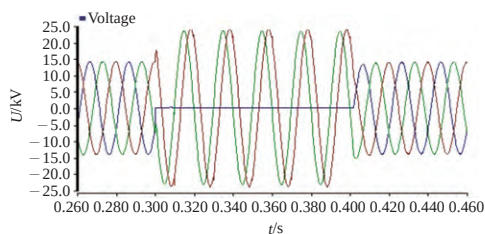


图12 上游远端站220 kV侧发生A相接地短路故障

图9~图12分别为不同位置发生A相接地短路时终端变电站10 kV侧(用户侧)电压变化情况。由图可知,当用户侧发生单相接地故障时,故障相电压会迅速跌落至很小甚至为零(与接地电阻有关)。对于中性点接地系统,其余两相幅值不变;对于中性点不接地系统,其余两相增大至 $\sqrt{3}$ (pu)。当输

电线路侧(220 kV)发生故障时,Y/D联结变压器会隔离一次侧零序分量,同时会引起二次侧暂降相角位移。以A相接地短路为例,故障相相位顺时针旋转 60° ,幅值增大到0.58 (pu);B相相位顺时针旋转 150° ,幅值不变;C相相位逆时针旋转 120° ,幅值降低为0.58 (pu)。当故障点距离逐渐增大时,由于线路阻抗等因素,暂降幅值会逐渐变小,即对用户侧的影响会变小,同时相位也会发生部分偏移。

通过以上分析可以看出,当电力系统中发生故障时,都会直接影响到用户侧电压。其程度由故障类型、故障点位置以及变压器类型等因素所决定。因此对于用户侧的电压暂降问题分析,不应只局限于用户本身,而应该仔细分析电压波形、暂降幅值以及相位变化等因素,合理推断并找到暂降源,进而采取相应措施来消除暂降带来的影响。

结束语

本文主要就某城市电网电压暂降问题进行了全面而又细致的分析。通过搭建仿真模型,分析了不同位置电压暂降对用户侧所造成的影响。得出结论如下:

1) 在正常运行以及发生典型故障时,将仿真结果同实际监测数据进行比对,验证了仿真模型的准确性和等效性。结果表明,仿真结果偏差基本在5%以下,因而该模型能够较好地等效实际全网情况,分析结果具有较强的说服力。

2) 除10 kV用户侧故障外,其他线路故障也会对用户侧电压造成影响。其影响程度与故障点位置、变压器型号等因素有关。具体来说,故障点位置离用户侧越远,所受到的影响越小,即电压暂降程度越低。同时,当变压器绕组接线类型不同时(Y0/Y0、Y/Y0或Y0/D),对用户侧各相电压的幅值、相位均会产生影响。

3) 为了能够更加全面、准确地了解负荷承受电压暂降的影响及获取暂降数据,同时能够有针对性消除暂降影响,应该在重点区域、敏感区

(下转第36页)

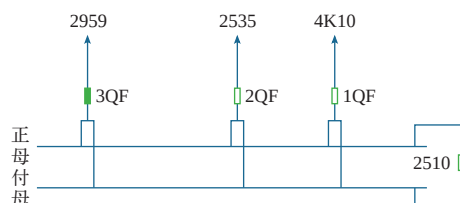


图5 220 kV戴圻变电站接线

就地联络通道开关，并检测联络通道闭合是否成功，将结果上报至控制系统主站以供策略修正；根据策略表跳开220 kV斗戴 4K10/2535双线，实现戴圻变电站负荷转移。

系统检同期判别逻辑如下：

1) 电压幅值差 $\leq dU_s$ 。

注： dU_s 为同期允许电压幅值差（% U_n ）。

2) 电压相角差 $\leq dT_s$ 。

注： dT_s 为同期允许电压相角差（°）。

当满足上述条件时，即判为检同期条件满足，其逻辑关系如图6所示。图中， U_I 、 U_{II} 为两组电压值；deg为两组电压相角值。

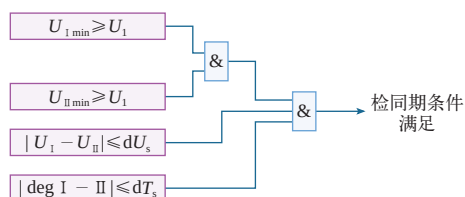


图6 满足检同期条件逻辑关系图

结束语

本文提出新型广域智能备自投系统，根据国家电网运行的实际需求，结合并借鉴国内外备用电源自动投入系统和安全自动装置，在实际功能配置及运行经验理论和应用成果的基础上，转变传统备用电源自动投入系统和安全自动装置逻辑功能的设计理念，优化配置原则，采用广域智能控制理念有效提升备用电源自动接入系统在电网安全稳定运行和确保供电可靠性上的突出作用。

(收稿日期：2015-02-10) EA

(上接第28页)

域以及故障集中区域的用户端加装更为完善的监测系统，这对于提高供电质量、解决用户投诉都有显著的意义。

参考文献

- [1] 闵伟，周志宇，周振华. 改进型Sage-Husa卡尔曼滤波器在电压暂降检测中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 145-149.
- [2] 代双寅，韩敏晓，严稳莉. 含分布式电源的配电网电压暂降评估[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 145-149.
- [3] 袁媛，吴丹岳，等. 电压暂降评估体系研究[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 128-133.
- [4] 王东旭，乐健，等. 复杂电网多重故障条件下的电压暂降分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 101-106.
- [5] 郑幸. 基于蒙特卡洛法的配电网可靠性评估[D]. 武汉：华中科技大学，2011.
- [6] 吕干云，孙维蒙，等. 电力系统电压暂降源定位

方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 241-245.

- [7] 吕干云，孙维蒙，等. 利用三点法的电压暂降源定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 36-40.
- [8] 钟庆，易杨，等. 电力用户电压暂降问题分析与仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 38(23): 241-245.
- [9] Jose Maria Carvalho Filho, Roberto Chouhy Leborgne, et al. Validation of voltage sag simulation tools: ATP and short-circuit calculation versus field measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1472-1480.
- [10] 周超. 电压暂降监测点优化配置及其故障点定位估计[D]. 济南：山东大学，2012.
- [11] Zvonimir Klaic, Kresimir Fekete, et al. Propagation of the voltage sags through different winding connections of the transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1472-1480.

(收稿日期：2014-12-11) EA