

基于供电安全标准的配电网诊断方法研究

为克服可靠性统计指标中人为因素的影响,提出了基于供电安全标准的配电网诊断方法。首先深入剖析我国城市供电安全标准,选用配电网中常用的组负荷,建立基于不同故障情况下的组负荷量化指标;进而构建一套适用于我国城市配电网诊断评估方法,对配电网进行“ $N-1$ ”校验分析,汇总“ $N-1$ ”校验结果,按照不同故障类型对比组负荷量化指标;得到配电网诊断结果之后,给出相应的解决措施;最后结合实例分析,验证该方法的可行性和准确性。

程亮¹ 刘洪² 韩俊³ 李琥³ 李腾² / 1. 国网江苏省电力公司
2. 天津大学 3. 国网江苏省电力公司经济技术研究院



程亮 / 高级工程师

随着社会经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高,城市电网终端用户对供电安全性和供电可靠性水平提出了更高的要求^[1],如何以适度的投资满足用户可接受的供电安全性和供电可靠性要求^[2],成为我国城市电网面临的主要问题和难点。

目前一般采用可靠性评估作为考察电网现状和综合运营水平的重要手段,可靠性评估主要集中在停电频率、停电时间和停电范围三个方面,通过可靠性指标可以反映整个电力系统各环节对各用户的供电情况^[3]。而在停电频率方面,现阶段主要依靠人为统计方法,实际评估中人为因素较大,不能客观地反映电网实际情况;而停电时间和停电范围可以通过网络获取,需要一个量化指标进行衡量,判断停电时间和停电范围是否达到安全标准。因此,迫切需要根据我国城市电网的实际情况,科学合理地利用数据资源与运行经验,进行供电安全判据研究,为我国城市电网供电安全的发展与完善提供理论依据和方法保障。

本文首先通过明确“供电安全性”的基本概念和评价指标,进一步剖析我国城市供电安全标准的相关规定,得到相应的量化指标;基于这些指标,构建一套适用于我国国情的配电网诊断方法,本方法建立在“ $N-1$ ”校验基础上,按照具体量化指标和实际校验结果进行对比,分析不同情况下电网的安全性,同时给出相应的解决措施。通过该方法,使得配电网诊断从定性指标判定转变为定量判定方法,对我国配电网发展起到引导作用,同时对不同区域的运行维护水平的提升也有重要的促进作用。

供电安全判据分析

在借鉴国外的先进技术和理念的基础上,结合我国国情,国家能源局颁布了DL/T 256—2012《城市供电安全标准》,据此作为衡量标准。供电可靠性水平不仅取决于元件的质量和运行维护水平,还与元件停运后负荷所遭受的损失程度密切相关,即电网的供电安全性水平^[4]。必须科学合理地设定供电安全判据,制定出简单实用的供电安全标准,才能有效地达到我国城市配电网供电安全性诊断的要求。

1. 我国城市供电安全标准内容

我国城市供电安全标准规定较为详细,选取配电网中常用的组负荷,适用于配电网的供电安全水平要求如表1所示。

通过表1可知,配电网中主要考察“ $N-1$ ”停运情况。

2. 我国配电网供电安全判据分析

根据我国电网结构,绘制我国电网

关键词/Keywords

城市供电安全标准

组负荷量化指标

“ $N-1$ ”校验诊断流程

表1 我国城市供电安全标准（配电网常用组负荷部分）

供电等级	组负荷范围/MW	“N-1” 停运	“N-1-1” 停运
A	≤2	维修完成后：恢复组负荷	不要求
B	2~12	3 h内：恢复负荷=组负荷-2 MW 维修完成后：恢复组负荷	不要求
C	12~180	15 min内：恢复负荷≥min（组负荷-12 MW，2/3组负荷）。 3 h内：恢复组负荷	不要求

注：用户组通常由两条（或两条以上）常闭回路供电，或者由一条常闭回路供电，但可以通过人工或自动的开关切换到其他回路，组负荷是指用户组的最大负荷。

结构中常用设备容量如表2所示。

表2 我国配电网结构中常用设备容量

设备	变压器常用容量/线路 极限容量/（MV·A/MW）	变电站负载/线路输送 容量/（MW/MW）	负荷 分级
10/0.4 kV变压器	1, 0.8, 0.5, 0.4, 0.315, 0.2, 0.05	≤0.5	A
10 kV线路	8	3~4	B
35/10 kV变压器	20, 16, 5	5~10	B
110/10 kV变压器	63, 50, 40, 31.5, 20	30~170	C
35 kV线路	30	12~15	C
110 kV线路	100	40~50	C

表2中，变压器的负载率取50%~70%，线路的容量计算公式为

$$S = \sqrt{3}UI$$

式中， U 为线路电压； I 为线路载流量。

考虑线路不可满载运行，本文按照容量的40%~50%作为线路输送容量。

我国城市电网供电安全标准根据组负荷的大小将组负荷划分为A级~F级一共六个等级，级别越高，回路停运后的供电恢复时间越短，负荷恢复程度越高。

本文重点分析配电网安全诊断，组负荷的供电等级集中在A~C级，故选取A~C级进行具体分析。

A级：组负荷范围在0~2 MW。单台10/0.4 kV变压器的典型容量为0.015~1 MV·A。相邻两个分段开关将几台（通常选取五台以下）10/0.4 kV变压器隔离成一个单元，每个单元的负荷约为0~2 MW，不需要其他供电回路。

B级：组负荷范围在2~12 MW。一条10 kV线路输送容量是3~4 MW，单台35/10 kV变压器

常见容量为：31.5 MV·A、20 MV·A、16 MV·A、5 MV·A。35/10 kV变电站的典型容量构成为5×2 MV·A、16×2 MV·A，所带负载约为5~10 MW。该部分所提供的负荷约为2~12 MW。

C级：组负荷范围在12~180 MW。一条35 kV线路输送容量是12~15 MW，单台110/10 kV变压器常见容量为63 MV·A、50 MV·A、40 MV·A、31.5 MV·A、20 MV·A。110/10 kV变电站的典型容量构成为31.5×2 MV·A、40×2 MV·A、50×2 MV·A、63×2 MV·A和63×4 MV·A，所带负载约为30~170 MW。该部分所提供负荷约为12~180 MW。

针对不同供电等级的组负荷，恢复容量也表现出具体量化的差别对待。具体分析如下所示：

- 1) 组负荷-2 MW。2 MW作为中压10 kV线路上的一个分段的最大负荷，组负荷-2 MW表示一条中压线路的负荷去掉停运分段的负荷。
- 2) 组负荷-12 MW。12 MW表示一条35 kV线路所带负荷，组负荷-12 MW表示一个110/10 kV变电站的总负荷减去一条35 kV线路的负荷。
- 3) 组负荷-60 MW。60 MW表示一条110 kV线路的最大负荷，组负荷-60 MW表示一个220/110 kV变电站减去一条110 kV线路的负荷。
- 4) 2/3组负荷。通过对我国国内情况的分析可以看出，夏季典型负荷水平是年最大负荷的2/3（典型负荷是指在所评估的时段中，80%的时间负荷是在该水平以下），此时所有C级负荷组在“N-1”计划停运情况下不损失负荷，在“N-1”故障停运情况下，损失部分负荷，通过遥控操作重构电网（即15 min之后），可以恢复2/3组负

荷, 3 h以后, 恢复全部组负荷。

供电安全诊断流程

1. 供电安全诊断流程

在剖析城市供电安全标准, 形成量化指标依据后, 构建的诊断方法流程如图1所示。

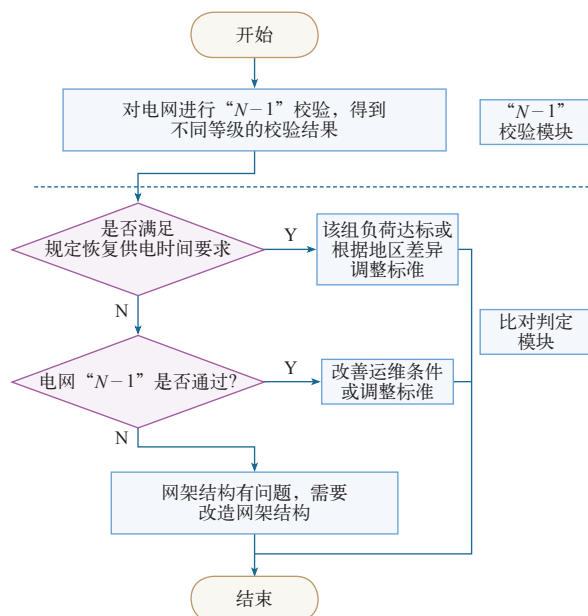


图1 配电网诊断方法流程示意图

按照图1所示, 基于城市供电安全标准的量化结果, 首先利用“ $N-1$ ”校验模块对电网进行分析, 进一步利用得到的结果通过比对模块处理, 得到相应的评估结论, 并给出解决措施, 完成整个评估流程。

2. “ $N-1$ ”校验模块

该模块主要是针对输入的电网结构进行自动“ $N-1$ ”校验, 对不能通过“ $N-1$ ”校验的元件标示出来, 可以通过校验的元件给出负荷转供方案, 记录可以转供负荷的大小。在“ $N-1$ ”校验原则的基础上, 利用拓扑分析、接线模式分析、潮流计算和转供方案分析, 对电网进行比较全面的“ $N-1$ ”校验, 如图2所示。

基础数据处理模块分为三个部分: 拓扑结构分析、接线模式分析和线路潮流计算。

通过对系统原始数据的梳理, 针对“ $N-1$ ”校验方法中提出的潮流计算方法, 对得到的数据

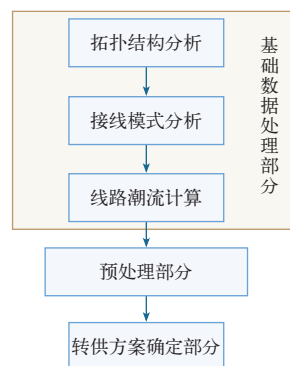


图2 “ $N-1$ ”校验模块组成部分

进行换算和标么化处理, 使之成为可供算法使用的数据。通过电网拓扑分析可以找出主变压器和线路之间的联络关系以及开关的状态信息, 为“ $N-1$ ”校验计算中开关操作选择集提供数据准备。通过潮流计算得到各个主变压器供出功率, 各元件流过的潮流, 为“ $N-1$ ”算法中主变压器最大转带负荷, 线路最大转供负荷等提供数据准备。进一步结合之前的接线模式分析, 以及潮流计算方法, 为即将开始的“ $N-1$ ”校验工作做好前期准备。

预处理部分主要有两大功能: 一是排除明显不能通过校验的数据, 并把它们输入到结果表中; 另外一个功能是筛选明显能通过校验的数据, 输入结果表中。其余数据进入需要校验的元件表中。

明显不能通过校验的数据包括通过拓扑和接线模式分析得到的单辐射线路, 这样的线路没有转供路径, 一旦变电站母线出线出口段发生故障, 必然导致该条出线所供区域大面积停电, 直接被判为不能通过校验的线路。明显能通过校验的数据主要是指变电站中最大容量主变压器故障, 另一台主变压器可以转带站内所有负荷的情况。这种情况下直接判定该变电站通过主变压器“ $N-1$ ”校验。

“ $N-1$ ”校验预处理部分有效地减少了所需校验的元件的个数, 可以化简校验过程, 提高校验速度。

“ $N-1$ ”校验转供方案确定部分是“ $N-1$ ”校验算法模块的核心部分, 它的作用是针对需校

验元件表中的元件进行“ $N-1$ ”校验并且给出转供路径,记录转供负荷的大小。

3. 比对判定模块

通过“ $N-1$ ”校验模块对电网的分析之后,得到相应的结果分析表,该结果表中记录有对应的元件是否通过“ $N-1$ ”校验,转供路径的选择,转供负荷的大小等信息。具体比对按照线路故障、主变压器故障和变电站全停三个方面进行逐一分析。

根据转供负荷的大小以及转供时间的长短,结合城市供电安全标准进行对比分析,得到分析结果并给出相应的措施。

通过校验结果分析表和城市供电安全标准对比分析,按照差异化层次化的结构逐一对照,得到的分析结果具有较高的可信度。在此基础上,可以对电网架构进行进一步分析。

不同级别组负荷完全满足城市供电安全标准的要求。该类负荷在时间上满足标准中的详细规定,转供负荷量也达到标准中的明确要求。可以认为该部分电网结构达到安全供电要求。根据不同地区发展程度不同,如果实际情况普遍比该标准要求的时间短,可以按照实际情况进行修正标准,使得标准可以起到促进电网结构以及运维水平提高的作用。

存在某个级别组负荷不满足城市供电安全标准要求。该类负荷不满足相关要求,主要表现在在规定的时间内,不能转供负荷或者转供负荷不满足标准中要求的负荷量。这时,查询“ $N-1$ ”校验结果分析表,分析该部分元件是否通过“ $N-1$ ”校验。

1) 如果该部分元件可以通过“ $N-1$ ”校验,说明不达标的原因在于负荷转供时,人工重构过程耗时较长,需要提高运维水平;同时考虑该地区电网运维实际情况,如果普遍无法达到标准要求,则可以适当调整标准,更符合该地区实际情况。

2) 如果该部分元件无法通过“ $N-1$ ”校验,说明不达标的原因在于网络本身的问题,需要对电网进行改造,如何进行电网改造较为复杂,在本文中不予讨论。

实例分析

结合前文所述的城市供电安全标准的配电网诊断方法,构建实际算例,对提出的方法进行验证说明。

1. 区域A诊断情况

构建区域A,按照前文所述的诊断评估方法和流程,验证该方法的可行性。具体算例构造参数以及分析结果如下。

区域A包含三个变电站,相应示意图如图3所示。A1站为110 kV变电站,该站位于A区西北部,供电范围为关城南路以北的部分工业用地及少数居住用地。目前有26条线路为该覆盖区域供电。A2站为35 kV变电站,该站位于A区西南部,供电范围为该区域西部地区内的以居住为主的生活用地。该站共有16条线路为该覆盖区域供电。A2站为35 kV变电站,该站位于A区中东部,该站主要供电范围为该区域西部地区以居住为主的生活用地,该站共有14条线路为该覆盖区域供电。由于A2和A3之间有天然屏障,因此无法形成互联。

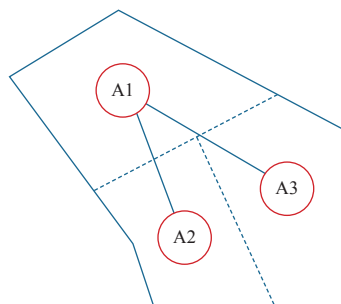


图3 区域A变电站分布示意图

该区域运行维护水平时间标准如下,故障维修完成时间是10 h,基于人工重构的恢复时间为5 h,基于遥控重构电网所需时间为20 min,自动切换所用时间为60 s。

2. 区域A“ $N-1$ ”校验结果

按照前文所述的分析方法,对区域A电网进行“ $N-1$ ”校验分析,按照主变压器“ $N-1$ ”校验和线路“ $N-1$ ”校验进行分析。

按照诊断流程,得到线路“ $N-1$ ”校验结果如表3所示。变电站“ $N-1$ ”校验的结果如表4所示。

表3 区域A 10 kV线路“N-1”分析结果

变电站	线路名称	联络方式	线路负荷/kW	可转带负荷/kW	是否通过“N-1”	变电站	线路名称	联络方式	线路负荷/kW	可转带负荷/kW	是否通过“N-1”
A1	线1	单联络	1 524	2 476	是	A2	线29	多联络	1 120	2 880	是
A1	线2	多联络	1 653	1 347	是	A2	线30	多联络	1 333	2 267	是
A1	线3	多联络	2 387	1 613	是	A2	线31	多联络	1 519	2 481	是
A1	线4	单联络	1 559	2 441	是	A2	线32	多联络	1 021	1 979	是
A1	线5	单辐射	1 346	—	否	A2	线33	单联络	1 105	2 895	是
A1	线6	单辐射	1 847	—	否	A2	线34	单联络	1 231	2 469	是
A1	线7	单辐射	2 044	—	否	A2	线35	单联络	1 152	2 648	是
A1	线8	单辐射	1 523	—	否	A2	线36	单联络	1 226	2 774	是
A1	线9	多联络	2 102	1 860	是	A2	线37	多联络	1 237	2 763	是
A1	线10	单联络	1 879	2 121	否	A2	线38	单联络	1 032	2 868	是
A1	线11	多联络	1 865	2 135	是	A2	线39	单辐射	1 255	—	否
A1	线12	多联络	1 623	2 377	是	A2	线40	单辐射	1 065	—	否
A1	线13	多联络	1 116	2 884	是	A2	线41	单辐射	1 126	—	否
A1	线14	多联络	1 356	2 644	是	A2	线42	单辐射	1 176	—	否
A1	线15	多联络	1 645	2 355	是	A3	线43	多联络	1 744	2 256	是
A1	线16	多联络	2 496	1 504	是	A3	线44	多联络	1 206	2 794	是
A1	线17	多联络	1 212	2 788	是	A3	线45	多联络	2 343	1 857	否
A1	线18	单联络	1 742	2 258	是	A3	线46	多联络	1 542	2 258	是
A1	线19	单联络	1 435	2 565	是	A3	线47	单联络	1 615	2 385	是
A1	线20	单联络	1 318	2 682	是	A3	线48	多联络	1 375	2 625	是
A1	线21	多联络	1 764	2 236	是	A3	线49	单联络	1 464	2 536	是
A1	线22	单联络	2 317	1 683	是	A3	线50	单联络	1 717	2 283	是
A1	线23	单联络	1 435	2 565	是	A3	线51	单辐射	1 032	—	否
A1	线24	单联络	1 767	1 206	是	A3	线52	单辐射	1 390	—	否
A1	线25	单联络	1 232	2 768	是	A3	线53	单辐射	1 258	—	否
A1	线26	单联络	2 315	1 685	是	A3	线54	单辐射	1 015	—	否
A2	线27	单联络	1 235	2 565	是	A3	线55	单辐射	1 265	—	否
A2	线28	单联络	1 167	1 206	是	A3	线56	单辐射	1 034	—	否

表4 区域A变电站“N-1”分析结果

分区	变电站名称	负荷/MW	主变压器容量/MV·A	10 kV侧总容量/MV·A	联络线路转带负荷/MV·A	主变压器能转负荷/MW	是否通过	失电负荷/MW
区域A	A1	41.3	2×40	80	5.7	40	否	1.3
	A2	23	2×20	40	5.7	20	否	3
	A3	21	2×20	40	0	20	否	1

3. 区域A比对分析结果

当线路发生故障时，线路分为故障部分和非故障部分。故障部分需要等到维修完成后恢复供电，主要判断维修时间是否达到安全标准要求；非故障部分需要依靠联络转供该部分负荷，主要判断转供时间是否达到安全标准要求。以下分析认为A区配电自动化水平较低，均基于人工倒闸操

作完成转供工作。

按照上表分析结果，详细描述如下：

1) A1站线路线5、线6、线7和线8，A2站线路线39、线40、线41和线42，A3站线路线51、线52、线53和线54、线55和线56。这些线路是单辐射线路，不满足“N-1”校验，发生故障时无法转带负荷，需要等到线路故障维修后才能恢复供

电。其中A1站线路5、线6和线8，A2站线路39、线40、线41和线42，A3站线路51、线52、线53、线55和线56，这些线路属于A级负荷，维修时间10 h，暂时无法达到安全供电标准，不满足要求；A1站线路7，A3站线路54所带负荷较大，属于B级负荷，当故障发生时不能转供出达到标准的负荷量，因此需要对该部分线路进行改造升级，使之满足供电安全标准所规定的转供时间。

2) A1站线路10，A3站线路45。这些线路是单联络线路，由于转供容量不足，当发生故障时不能转带全部负荷，不满足“ $N-1$ ”校验，存在部分负荷需要在故障维修完成后恢复供电。需要转供的部分可以在5 h之内完成转供，不满足供电安全标准规定时间，其余部分在故障维修完成

后，即10 h之后恢复供电，不满足供电安全标准。

3) 其余线路。其余线路都是有联络的线路，可以通过“ $N-1$ ”校验，在5 h之内完成转供，但该时间不满足供电安全标准的要求。

经过上述分析，该区域的运行维护水平无法满足供电安全标准要求，加上2条亟待改进的线路，该地区需要提升自身的运行维护水平。

当主变压器发生故障时，首先考虑站内转供能否完成，一般站内转供可自动完成，时间大概为60 s；当主变压器负载率较高时，无法通过站内转供恢复供电，则需要停供部分线路，此时进一步判断站间联络是否有充足的转供容量，对比供电安全标准研究转供时间是否达标，不能转供的部分等到维修完成后恢复供电。区域A变压器故障分析结果如表5所示。

表5 区域A变压器故障分析结果

分区	名称	负荷 /MW	主变压器容量 /MV·A	总容量 /MV·A	主变压器转带负荷 /MW	恢复时间 /s	线路转带负荷 /MW	恢复时间 /s	失电负荷 /MW	恢复时间 /s
区域A	A1	41.3	2×40	80	40	60	1.3	5	0	—
	A2	19	2×20	40	19	60	3	5	0	—
	A3	20	2×20	40	20	60	0	—	1	10

根据城市供电安全标准中要求，故障维修时间为8 h，基于人工重构电网恢复供电所需要的时间为3 h，完成自动切换所需要的时间为60 s。

按照上表分析结果，详细描述如下：

1) 变电站A1，故障发生时按照单主变压器负载130%进行转带可以通过主变压器转供相应负荷，通过自动切换完成转带需要60 s，满足供电安全标准中的规定；按照单主变压器负载100%进行转带，可以通过自动切换转供部分负荷，其余部分可以通过线路进行转供，在转供时间5 h内转供1.3 MW负荷，但由于转供时间过长，不满足供电安全标准规定。

2) 变电站A2，故障发生时按照单主变压器负载130%进行转带可以通过主变压器转供相应负荷，通过自动切换完成转带需要60 s，满足供电安全标准中的规定；按照单主变压器负载100%进行转带，可以通过自动切换转供部分负荷，其余部分可以通过线路进行转供，在转供时间5 h内转供

3 MW负荷，但由于转供时间过长，不满足供电安全标准规定。

3) 变电站A3，故障发生时按照单主变压器负载130%进行转带可以通过主变压器转供相应负荷，通过自动切换完成转带需要60 s，满足供电安全标准中的规定；按照单主变压器负载100%进行转带，可以通过自动切换完成主变压器转供部分负荷，其余部分通过线路转供，但是由于该变电站没有站间联络线，剩下的1 MW失电负荷在维修完成后，即10 h后恢复供电，该维修时间均不满足供电安全标准中的要求。

4. 分析结果汇总

区域A由于受到天然屏障的限制，无法形成变电站互联，因此整个区域联系效果较差，A1站线路7，A3站线路54所带负荷较大，属于B级负荷，当故障发生时不能转供出达到标准的负荷量，因此需要对该部分线路进行改造升级；同时该区域单辐射线路较多，需要改善网络结构；

加上该地区运行维护水平较差,无法达到现行的供电安全标准,为了避免苛刻规定对区域发展的不利影响,因此需要对供电安全标准进行修订,上调标准维修时间为9 h,基于人工重构电网恢复供电所需要的时间为4 h,以适应该地区的实际情况,促进运维水平提升。

结束语

由于城市供电安全水平亟待提升,依靠可靠性指标的评估方法不能定量地对电网结构进行诊断,基于供电安全标准具体量化要求的配电网诊断方法,具有以下特点:

1) 城市供电安全标准具有深厚的理论和工程实践背景,逻辑严密基础严谨,而且是完全量化的确定性准则,简洁明了,便于直接使用。并且根据我国城市电网实际情况制定,基于多年的实际操作经验和多地调研汇总的结果,可以充分反映现阶段我国电网架构的性能水平。

2) 配电网诊断方法层次分明,结构性强,结合实际情况构建的标准不但区分了不同级别的负荷,更从电网结构层次上进行了划分。

3) 针对不同的层次结构,制定有区别有差异的量化指标,因而选取该标准作为配电网诊断标准,具有很强的指导意义,在此基础上可以给出相应的解决措施和针对地区特点修正安全标准。

参考文献

- [1] 丁一明,张静,李生虎.基于序贯蒙特卡罗仿真的配电网可靠性评估模型[J].电网技术,2004,28(3):38-42.
- [2] 谷群辉,罗安,王击,等.一种实用的供电可靠性预测评估算法[J].电网技术,2003,27(12):76-79.
- [3] 雷秀仁,任震,黄雯莹.处理配电系统可靠性评估不确定性的未确知数学方法[J].电力系统自动化,2005,29(17):28-33.
- [4] 于会萍,马则良.电网规划方案的成本效益分析与评价研究[J].电网技术,2001,25(7):32-35.
- [5] 张谦,杨晓梅,王晓晖.英国供电安全工程建议RPZ/6剖析[J].电网技术,2008,32(18):96-102.
- [6] 周志超,张焰,王伟,等.变电站供电可靠性的定量评估[J].电力系统自动化,2004,28(9):66-69,80.
- [7] Li Wenyuan. Incorporating aging failures in power system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3).
- [8] 范明天,张祖平.中国配电网发展战略相关问题研究[M].北京:中国电力出版社,2008.
- [9] Li Wenyuan, Billinton R. Common cause outage models in power system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2).
- [10] 毕鹏翔,刘健,刘春新,等.配电网重构的改进遗传算法[J].电力系统自动化,2002,26(2):57-61.
- [11] Liu Chencheng, Seung Jae Lee. An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(2):619-626.
- [12] Nagata T, Sasaki H, Yokoyama R. Power system restoration by joint usage of expert system and mathematical programming approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3):1473-1478.
- [13] 郭永基.电力系统可靠性分析[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [14] Lee H Willis. Power distribution planning reference book[M]. New York: Marcel Dekke. Inc., 1997.
- [15] 范明天.我国与国外城市电网供电安全性标准的比较[J].供用电,2007,24(5):5-8.
- [16] 朱海峰,程浩忠,张焰.电网灵活规划的研究进展[J].电力系统自动化,1999,23(17):38-41.
- [17] 姜宁,王之伟,倪炜,等.借鉴国际先进规划理念建设南京坚强城市电网[J].供用电,2007,24(5):1-4.

(收稿日期:2015-04-01) EA