

## 基于馈线互联关系的配电网安全域模型

肖峻<sup>1</sup>, 苏步芸<sup>1</sup>, 贡晓旭<sup>2</sup>, 王成山<sup>1</sup>

(1. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 100052)

**摘要:** 现有配电网安全域模型都是基于变电站主变互联关系的, 且只考虑了主变  $N-1$  故障, 简化了馈线间的详细拓扑关系, 导致所得结果不能完全与  $N-1$  仿真一致。为解决这一问题, 首先提出了基于馈线互联的配电系统安全域模型, 全面计及了主变  $N-1$  和线路  $N-1$  故障。新模型描述的安全边界可精确到馈线段负荷, 并可适用于多联络的复杂配电网。其次, 给出了安全域边界的解析算法, 边界计算结果为不等式组所形成的超平面表达式。最后, 设计了基于  $N-1$  仿真的两种验证方法对安全域边界的准确性进行验证。算例表明, 该模型能够更准确快速地描述配电网的安全运行区域和  $N-1$  安全边界, 为安全域方法更精确地指导配电网安全高效运行奠定了理论基础。

**关键词:** 配电网; 安全域; 模型; 主变互联;  $N-1$  仿真; 馈线互联

### Model of distribution system security region based on interconnections of feeders

XIAO Jun<sup>1</sup>, SU Buyun<sup>1</sup>, GONG Xiaoxu<sup>2</sup>, WANG Chengshan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Power Economic Research Institute, Beijing 100052, China)

**Abstract:** Existing model of distribution system security region is based on interconnections of substation transformers. This model simplifies the detailed topological connections of feeders, which results in that the security boundary cannot match results of  $N-1$  point-by-point simulation. To solve this problem, this paper firstly proposes a new model of distribution system security region based on interconnections of feeders, which considers both transformer  $N-1$  and feeder  $N-1$  contingency and its result includes load of feeder sections. The model can also be applied to the complex distribution networks with multi-links. Secondly, a parsing algorithm of security region boundary is presented based on the model, and its results are hyperplan expressions formed by set of inequalities. Thirdly, to validate the accuracy of security region model, two kinds of  $N-1$  simulation proof methods are designed. Results of a study case show that the proposed model can describe distribution security boundary more precisely and rapidly, which can lay a theoretical foundation for precise guidance of secure and efficient operation of distribution system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477112).

**Key words:** distribution system; security region; model; interconnections of substation transformers;  $N-1$  simulation; interconnections of feeders

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)20-0036-09

## 0 引言

随着智能配电网的发展, 配电自动化会不断得到普及, 快速转供能力将成为未来配电网运行的一个新边界条件<sup>[1]</sup>, 配电网在自动化程度上将与输电网更接近。输电网安全域<sup>[2-4]</sup>的研究已经形成了系统的理论并不断深入应用, 所以将安全域的方法学<sup>[5]</sup>用于配电网, 提高其安全和效率, 也成为一种可能<sup>[6]</sup>。

近年来, 配电网最大供电能力(Total Supply Capability, TSC)理论<sup>[7-8]</sup>的提出为发展配电网安全域理论奠定了一定的研究基础。文献[9]提出了基于主变互联关系的TSC模型; 文献[10-11]提出的供电能力计算方法仅考虑了后果较为严重的主变 $N-1$ 故障, 未计及线路 $N-1$ 约束; 文献[12]提出的配电网安全评估方法虽考虑线路 $N-1$ 故障, 但忽略了主变容量约束; 文献[13]进一步将TSC模型精细到馈线互联关系, 并完整考虑了馈线 $N-1$ 和主变 $N-1$ 。而TSC与 $N-1$ 安全边界存在密切的联系, TSC工作点正好位

于 $N-1$ 安全边界上。文献[14-15]在TSC模型基础上, 借鉴了输电安全域的概念, 提出了配电网安全域(Distribution System Security Region, 简称DSSR)的定义和模型, 将DSSR定义为运行中满足 $N-1$ 准则的所有工作点的集合, 还给出了利用DSSR进行在线安全评价和控制的方法。

文献[14-15]提出的配电网安全域模型基于变电站主变间的互联关系, 简化了馈线间的详细拓扑联络关系, 导致其计算所得的安全边界不能完全与 $N-1$ 仿真结果一致。并且, 其模型仅考虑了主变 $N-1$ 故障, 未全面考虑所有馈线 $N-1$ 故障。事实上, 尽管主变 $N-1$ 故障更严重, 但并非所有主变 $N-1$ 校验通过都能保证馈线 $N-1$ 能够通过。一些算例已表明, 基于主变互联的安全域边界上的TSC点并不能保证通过 $N-1$ 仿真的校验<sup>[16]</sup>。而输电安全域也采用逐点法来验证准确性<sup>[17]</sup>。

文献[18]提出了 $N-1$ 逐点仿真逼近的配电网安全域边界算法, 能精确得出部分 $N-1$ 安全边界。但该方法很难完整地描述DSSR边界, 并且搜索安全边界工作点的计算量非常大。而解析方法能够从根本解决该问题。本文提出了能反映馈线间拓扑联络关系并完整考虑馈线 $N-1$ 故障、计算速度更快的配电网安全域模型, 并通过 $N-1$ 仿真法和 $N-1$ 仿真逼近法验证其准确性。

## 1 配电系统安全域(DSSR)简介

$N-1$ 安全准则是配电网的重要技术准则, 是指配电网在运行时, 当配电网中的某个元件(如主变、馈线等)发生故障, 电网中不会出现不应该的用户停电。配电网 $N-1$ 校验主要包括馈线 $N-1$ 和主变 $N-1$ 两种。馈线 $N-1$ 校验是考查单条馈线出口故障时, 能否将馈线负荷转带到其他相联络的馈线。主变 $N-1$ 校验考查单台主变退出时能否将负荷转带到站内其他主变或通过网络转带到其他变电站。本文中模型既计及主变 $N-1$ 约束又计及了馈线 $N-1$ 约束。

本文配电系统安全域定义为在配电网主变 $N-1$ 和馈线 $N-1$ 的约束下, 配电网能够安全运行的所有工作点的集合。工作点是指配电网某一时刻所有状态量的集合。需要选取能够完整表达系统状态的一组独立状态量代表工作点, 本文选取馈线段负荷为状态量, 即用馈线段负荷组成的一个 $n$ 维向量来表示。

$$\mathbf{W}_f = (F_1, F_2, \dots, F_n)^T \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{W}_f$ 表示基于馈线段负荷的工作点向量;  $F_i$ 表示馈线段负荷;  $n$ 表示全网馈线段的个数。

馈线段负荷 $F_i$ 的出现是因为在多分段多联络线

路上, 馈线出口负荷可以转带到多条联络线路上, 产生由分段开关和联络开关隔开的馈线段。以图1两分段两联络为例, 馈线1所带负荷可以同时转带到馈线2和馈线3上, 所以馈线1的馈线出口负荷可分为馈线段负荷 $F_i$ 和 $F_j$ 。

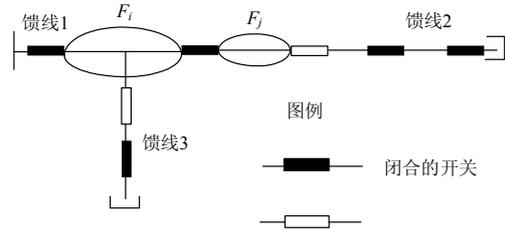


图1 馈线负荷示意图

Fig. 1 Introduction of feeder load

对于单联络线路, 馈线出口负荷只能转带到一条联络线路上, 所以馈线段负荷 $F_i$ 等同为馈线出口负荷, 即是多联络的一种特例。

选取的状态量还要求是可观测的。对于单联络线路, 馈线段负荷即为馈线出口负荷, 目前条件下全部的馈线出口负荷都有数据采集, 是可观测的。对于多分段多联络的馈线来说, 需要在分段开关处配备负荷监测装置, 目前随着智能电网的发展, 我国城市地区正较大范围地推广配电自动化, 馈线段负荷数据采集的基础条件将逐步具备。并且, 配电自动化可以实现开关遥控, 负荷能通过配电网络快速转带。

文献[14]以主变负荷描述工作点, 本文选取的工作点进一步详细到馈线段, 使建立计及馈线互联关系和馈线 $N-1$ 的DSSR模型成为可能。

## 2 基于馈线互联的DSSR模型

### 2.1 DSSR模型表达式

在主变 $N-1$ 和馈线 $N-1$ 的共同约束下, 配电网安全域需满足的约束为<sup>[13]</sup>

$$f_m = \sum_{k=1} trf_{mk} \quad (2)$$

$$P_i = \sum_{f_m \in T_i} f_m (\forall i) \quad (3)$$

$$trt_{ij} = \sum_{f_m \in T_i, f_k \in T_j} trf_{mk} \quad (4)$$

$$trf_{mk} + f_k \leq RF_k^{(m)} (\forall m, k) \quad (5)$$

$$trt_{ij} + P_j \leq R_j (\forall i, j) \quad (6)$$

式中:  $trf_{mk}$ 表示馈线 $m$ 发生 $N-1$ 故障时转带给馈线 $k$ 的负荷, 等价于工作点分量中的馈线段负荷 $F_m$ ;  $f_m$ 表示第 $m$ 号馈线所带的馈线出口负荷, 对于单联

络线路,  $f_m$  等于馈线段负荷  $F_m$ , 对于多联络线路,  $f_m$  等于馈线  $m$  分成的馈线段负荷之和;  $P_i$  表示主变  $i$  所带的负荷;  $trt_{ij}$  表示主变  $i$  发生  $N-1$  故障时转带给主变  $j$  的负荷量;  $RF_k^{(m)}$  为馈线  $k$  的容量, 也表示馈线  $m$  和馈线  $k$  有转带关系, 馈线  $m$  发生  $N-1$  故障后将负荷转带到馈线  $k$  上;  $R_j$  表示主变  $j$  的额定容量;  $T_i$  表示主变  $i$ ;  $F_m \in T_i$ , 表示馈线  $m$  出自主变  $i$  的对应母线。

式(2)为馈线负荷等式, 描述馈线  $m$  的出口负荷等于其馈线段负荷之和。若馈线  $m$  是单联络, 则其只有一个馈线段; 若馈线  $m$  为多分段多联络, 当馈线出口故障或主变故障导致馈线失电时, 每个馈线段负荷可转带给不同馈线。

式(3)为主变-馈线负荷等式约束, 表示主变  $i$  所带的负荷等于其所出馈线负荷之和。

式(4)为主变  $N-1$  故障时的馈线负荷转带等式约束, 表示当主变  $i$  发生故障或检修退出运行时, 其转带给主变  $j$  的负荷是通过与两台主变相连馈线间的负荷转带完成的。

式(5)为馈线  $N-1$  约束, 表示馈线  $m$  发生  $N-1$  故障后, 其馈线段负荷通过联络开关转带给其他馈线, 负荷转带后其他馈线不能过载。

式(6)为主变  $N-1$  约束, 表示主变  $i$  发生  $N-1$  故障后, 主变  $j$  接受故障主变  $i$  转移负荷后的长时间运行负荷不超过其额定容量。

配电网安全域是满足式(2)~式(6)约束的所有工作点的集合, 可以表示为

$$\Omega_{DSSR_f} = \left\{ \begin{array}{l} W_f | F_i \leq \min(RF_u^{(i)} - f_u, R_i - \sum_{f_u \in T_i, f_j \in T_i} f_j - \\ \sum_{F_i \in T_j, F_k \in T_j, F_k \neq F_i} F_k), i=1,2,\dots,n \end{array} \right\} \quad (7)$$

不等式左边的  $F_i$  同式(1)描述, 表示馈线  $i$  的馈线段负荷是安全域中工作点分量。

不等式右边的  $RF_u^{(i)} - f_u$  为线路  $N-1$  约束条件。其中,  $f_u$  为与馈线段  $i$  有联络关系的馈线  $u$  的出口负荷, 且  $f_u$  为主变  $T_i$  所出馈线,  $RF_u^{(i)}$  为馈线  $u$  的最大传输容量。当馈线  $i$  出口故障或主变故障导致馈线失电, 发生线路  $N-1$  故障时,  $F_i$  转带到馈线  $u$ , 且馈线  $u$  不应发生线路过载, 即  $F_i$  必须小于等于  $RF_u^{(i)} - f_u$ 。

不等式右边的  $R_i - \sum_{f_u \in T_i, f_j \in T_i} f_j - \sum_{F_i \in T_j, F_k \in T_j, F_k \neq F_i} F_k$  为主变  $N-1$  约束条件。其中  $R_i$  为主变  $T_i$  的额定容量,  $\sum_{f_u \in T_i, f_j \in T_i} f_j$  为主变  $T_i$  所带馈线出口负荷之和,

$\sum_{F_i \in T_j, F_k \in T_j, F_k \neq F_i} F_k$  为除  $F_i$  外主变  $T_j$  转带到主变  $T_i$  的馈线段负荷之和。当主变  $T_j$  故障或检修退出运行发生主变  $N-1$  后, 不应引起主变  $T_i$  过载, 即  $F_i$  必须小于等于  $R_i - \sum_{f_u \in T_i, f_j \in T_i} f_j - \sum_{F_i \in T_j, F_k \in T_j, F_k \neq F_i} F_k$ 。

因为  $F_i$  需同时满足馈线  $N-1$  和主变  $N-1$  约束, 所以  $F_i$  小于等于二者的最小值。

即配电网安全域是指  $F_i$  满足以上约束条件的工作向量  $W_f$  的集合。

本文中的故障模式为考虑了最严重情况的出口故障, 但也是目前配电网  $N-1$  分析中较常用、适合配电网安全性研究的故障模式, 若根据实际电网的运行情况考虑故障发生的概率, 就可以得到更贴近实际的结果。

需要指出, 本文模型简化处理了网损和电压约束, 原因是城市配电路长度较短, 电压降落较小, 且可通过无功设备和变压器分接头调压。  $N-1$  校验一般都满足电压约束, 电压约束对结果影响不大, 可忽略或近似考虑。文献[19]针对电压约束和网损对最大供电能力的影响研究结果也表明, 除山区农村的过长线路外, 这样简化对结果影响不大。

此外, 模型中虽未出现基态约束, 但隐含了满足基态约束, 原因是若  $N-1$  后能满足约束, 则基态也能满足。

## 2.2 与基于主变互联模型比较

基于馈线互联关系的 DSSR 模型与基于主变互联关系的模型<sup>[14-15]</sup>相比, 将电网拓扑关系精确到馈线级别, 可同时考虑单联络和多联络接线模式, 其结果可精确到馈线段负荷  $F_i$ , 而基于主变的 DSSR 模型将主变间的馈线联络关系简化为主变联络通道, 其结果仅得到主变负荷  $P_i$ , 不能得到主变负荷在其所出馈线上的分布情况。

本文模型同时计及了馈线  $N-1$  和主变  $N-1$  约束, 其中式(2)和式(5)描述了馈线  $N-1$  的约束条件, 即任何一条馈线出口发生  $N-1$  并转带后, 线路都不过载, 式(3)、式(4)和式(6)描述了主变  $N-1$  的约束条件, 即当某一主变发生  $N-1$  后, 其负荷可通过站间的联络馈线转带到其他主变, 并且不导致其他主变过载。文献[14-15]基于主变互联的模型仅考虑了主变  $N-1$ , 认为主变  $N-1$  更严重, 但是研究表明, 对于一些工作点, 并不是主变  $N-1$  通过, 馈线  $N-1$  就一定通过<sup>[13]</sup>。例如, 主变有裕度满足主变  $N-1$ , 但是某些馈线负荷很高, 馈线  $N-1$  并不能完全满足。因此本文模型同时考虑了馈线  $N-1$ , 约束比文献[14-15]模型更严格和准确。而基于主变的模型用联

络通道代表了具体的联络馈线, 要描述馈线  $N-1$  存在困难。

### 3 基于馈线互联 DSSR 边界表达式

输电系统安全域可以采用解析表达式来表达安全域边界<sup>[5]</sup>。文献[18]研究发现, 配电系统安全域 DSSR 边界也具有线性、紧致、连通和内部无空洞等性质, 因此 DSSR 也可以解析描述其边界。对约束条件整理得到安全域边界表达式为

$$B_{\text{DSSR}} = \begin{cases} F_1 \leq \min(RF_u^{(1)} - f_u, R_l - \sum_{f_u \in T_i, f_j \in T_i} f_j - \sum_{F_i \in T_j, F_k \in T_j, F_k \neq F_i} F_k) \\ F_2 \leq \min(RF_u^{(2)} - f_u, R_l - \sum_{f_u \in T_i, f_j \in T_i} f_j - \sum_{F_i \in T_j, F_k \in T_j, F_k \neq F_2} F_k) \\ \dots \\ F_i \leq \min(RF_u^{(i)} - f_u, R_l - \sum_{f_u \in T_i, f_j \in T_i} f_j - \sum_{F_i \in T_j, F_k \in T_j, F_k \neq F_i} F_k) \\ \dots \\ F_n \leq \min(RF_u^{(n)} - f_u, R_l - \sum_{f_u \in T_i, f_j \in T_i} f_j - \sum_{F_i \in T_j, F_k \in T_j, F_k \neq F_n} F_k) \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $B_{\text{DSSR}}$  的每一个不等式为安全域的一个边界表达式,  $n$  个不等式取交集决定了安全域的边界。

可见, 配电系统的安全边界可由  $n$  个馈线段负荷空间的不等式组成, 每一个不等式表示一个安全边界, 其安全域是由  $n$  个馈线段负荷的超平面所围成的。如果配电网网架结构确定, 则该安全边界的表达式也是唯一确定的。

上述安全边界表达式同时计及主变  $N-1$  和馈线  $N-1$  故障, 细化了馈线容量和主变容量约束, 而文献[14-15]的边界表达式只计及了主变  $N-1$ , 其约束条件仅为主变容量约束和联络通道容量约束。所以本文可以更精确地表达配电网的  $N-1$  安全边界。

### 4 DSSR 边界的 $N-1$ 仿真验证方法

在得到配电系统的安全域边界表达式后, 其表达式是否准确, 需要通过  $N-1$  仿真进行验证。本文给出了两种验证方法。

方法一: 分别取配电系统安全域(DSSR)内、外和边界上的工作点进行  $N-1$  仿真校验。DSSR 内的工作点的所有负荷应全部通过  $N-1$  校验; DSSR 外的工作点的负荷应不能全部通过  $N-1$  校验; DSSR 边界上工作点应恰好在  $N-1$  校验的临界状态, 即任一馈线负荷稍微增加则校验不能完全通过。该方法如图 2 所示。

由于 TSC 点位于安全域的边界上, 上述方法中临界工作点可以选取 TSC 点<sup>[13,18]</sup>, 而位于安全域内、外的点可以在 TSC 点基础上进行增加或者减少得到。

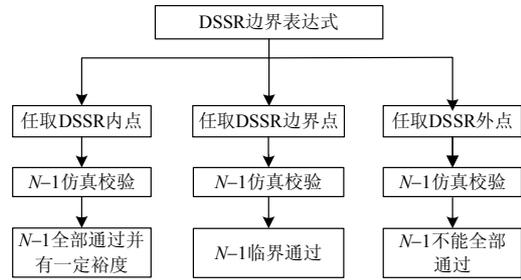


图 2  $N-1$  验证方法一

Fig. 2 First method of  $N-1$  test

方法二: 任取  $N-1$  仿真校验全部通过的一个工作点, 任取该工作点的一个负荷作为自由变量, 固定其他负荷, 利用文献[18]给出的  $N-1$  仿真逼近法, 即通过改变自由变量, 反复进行  $N-1$  校验, 直到  $N-1$  仿真校验达到临界状态, 得到该自由变量的值, 结合其他固定负荷得到一个安全域边界上的一个点, 将该点代入 DSSR 边界表达式中, 若该点恰好在边界上, 则验证通过; 否则验证不通过。该方法如图 3 所示。

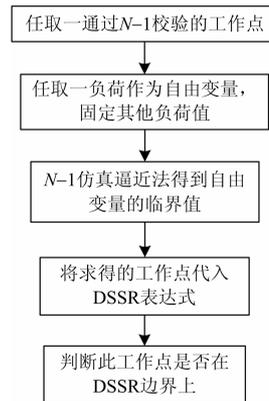


图 3  $N-1$  验证方法二

Fig. 3 Second method of  $N-1$  test

方法一先利用安全域得到工作点, 通过  $N-1$  校验证安全域的评价结果与  $N-1$  校验结果是否一致; 方法二通过逼近法获取  $N-1$  安全边界上的临界点, 再用安全域模型判断其是否在 DSSR 边界上。从两种不同角度验证, 能更好地证明计算所得的 DSSR 边界是否准确。

## 5 算例分析

### 5.1 DSSR 模型表达式

算例电网的网架结构如图 4 所示。该算例共 4 座 110 kV 变电站和 44 回 10 kV 馈线, 其中单联络馈线 40 回, 多分段多联络馈线 4 回。总变电容量为 360 MVA, 所有馈线容量均取 8.92 MVA。

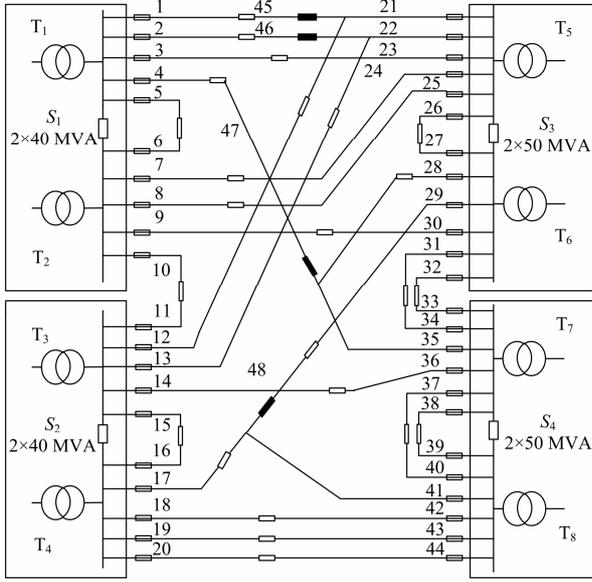


图 4 算例图

Fig. 4 Illustration of distribution system

### 5.2 算例电网的 DSSR 表达式

该算例中，多分段多联络中有 4 个馈线段负荷可单独转带，即馈线段可单独转带到与其联络的馈线，如馈线段 45 的负荷可转带到馈线 1。还有其他 44 个馈线出口负荷，故工作点向量的维数为 48，边界表达式有 48 个。采用基于主变互联的模型只有 8 个表达式。

根据式(8)得到算例安全域边界表达式。部分表达式见式(9-1)~式(9-7)，完整表达式见附录。

$$B_{DSSR} = \begin{cases} F_1 \leq \min(RF - (F_{45} + F_{21}), R_5 - (F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{45} + F_{46}) - (F_2 + F_3)) & (9-1) \\ F_2 \leq \min(RF - (F_{22} + F_{46}), R_5 - (F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{45} + F_{46}) - (F_1 + F_3)) & (9-2) \\ F_3 \leq \min(RF - F_{23}, R_5 - (F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{45} + F_{46}) - (F_1 + F_2)) & (9-3) \\ F_4 \leq \min(RF - F_{28}, R_6 - (F_{27} + F_{28} + F_{29} + F_{30} + F_{31} + F_{32})) & (9-4) \\ \dots\dots\dots \\ F_{46} \leq \min(RF - F_2, R_1 - (F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_{47})) - (F_{23} + F_{45}) & (9-5) \\ F_{47} \leq \min(RF - F_{35}, R_7 - (F_{33} + F_{34} + F_{35} + F_{36} + F_{37} + F_{38})) & (9-6) \\ F_{48} \leq \min(RF - F_{29}, R_6 - (F_{27} + F_{28} + F_{29} + F_{30} + F_{31} + F_{32})) & (9-7) \end{cases}$$

上式中，馈线容量  $RF=8.92$  MVA，主变容量  $R_1=R_2=R_3=R_4=40$  MVA， $R_5=R_6=R_7=R_8=50$  MVA。每个式子构成一个超平面，该算例的 DSSR 是由 48 个超平面围成的。

以式(9-1)为例说明 DSSR 边界表达式的物理含义。图 5 为与馈线 1 相关联的局部拓扑关系。

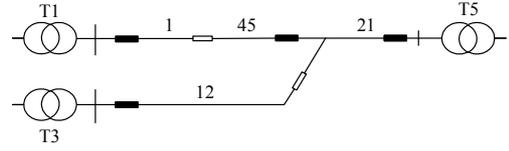


图 5 与馈线 1 联络的局部拓扑关系

Fig. 5 Part topology of feeder 1 connections

式(9-1)左边的  $F_1$  为馈线 1 的馈线段负荷，也是馈线出口负荷。

式(9-1)右边的  $RF - (F_{45} + F_{21})$  为线路 N-1 约束条件。 $F_{45} + F_{21}$  为多分段多联络转供线路 21 的馈线出口负荷之和。当馈线 1 发生线路 N-1 故障时， $F_1$  转带到馈线 21 不应发生线路过载，所以  $F_1$  必须小于等于  $RF - (F_{45} + F_{21})$ 。

$R_5 - (F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{45} + F_{46}) - (F_2 + F_3)$  为主变 N-1 约束条件。 $R_5$  为主变  $T_5$  的额定容量， $F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{45} + F_{46}$  为主变  $T_5$  所带馈线出口负荷之和， $F_2 + F_3$  为除  $F_1$  外主变  $T_1$  转带到主变  $T_5$  的馈线出口负荷之和。当主变  $T_1$  发生主变 N-1 故障后，不应引起主变  $T_5$  过载，所以  $F_1$  须小于等于  $R_5 - (F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{45} + F_{46}) - (F_2 + F_3)$ 。

所以  $F_1$  必须小于等于  $RF - (F_{45} + F_{21})$  和  $R_5 - (F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{45} + F_{46}) - (F_2 + F_3)$  的最小值。

### 5.3 N-1 仿真验证

TSC 工作点是安全边界上的点<sup>[18]</sup>，所以可以直接取基于馈线互联关系的 TSC 工作点进行 N-1 仿真验证。利用文献[13]方法计算该电网的 TSC，并得到达到 TSC 时的各个馈线出口负荷及线路负载率，见表 1。

#### 5.3.1 验证方法一

任取安全域内的工作点。对 TSC 点减小负荷，则该工作点一定位于安全域内。取  $F_{28}=1.00$  MVA，其他馈线负荷保持在 TSC 点。以此作为输入，利用文献[16]中的 N-1 校验方法，对其进行 N-1 安全性校验，此时校验结果全部通过。

取安全域边界上的 TSC 工作点 1，对其进行 N-1 安全性校验，校验结果见表 2 和表 3。

由表 2 和表 3 可见，当取 TSC 工作点时，馈线 23 和主变 4 处于 N-1 校验临界通过状态。“临界通过状态”即 N-1 校验恰好处于通过与不通过的临界状态，当任意馈线负荷稍微增加时，N-1 校验不通过；当任意馈线负荷稍微减少时，N-1 校验通过。

表 1 馈线的 TSC 允许负荷值

Table 1 Feeder load of TSC

馈线编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
负荷	3.54	3.54	4.38	3.54	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38
负载率/%	40	40	40	40	49	49	49	49	49
馈线编号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
负荷	4.38	4.38	3.54	3.54	4.38	4.38	4.38	3.54	4.38
负载率/%	49	49	40	40	49	49	49	40	49
馈线编号	19	20	21	22	23	24	25	26	27
负荷	4.38	4.38	5.38	5.38	4.38	4.38	4.38	4.38	3.54
负载率/%	49	49	60	60	49	49	49	49	40
馈线编号	28	29	30	31	32	33	34	35	36
负荷	3.54	4.38	4.38	4.38	4.38	4.38	5.38	4.38	4.38
负载率/%	40	49	49	49	49	49	60	49	49
馈线编号	37	38	39	40	41	42	43	44	
负荷	4.38	4.38	4.38	4.38	5.38	4.38	4.38	4.38	
负载率/%	49	49	49	49	60	49	49	49	

注: 负荷单位为 MVA

表 2 线路 N-1 结果表

Table 2 Result of feeder N-1 verification

馈线编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N-1 校验结果	1	1	1	1	1	1	1	1	1
馈线编号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
N-1 校验结果	1	1	1	1	1	1	1	1	1
馈线编号	19	20	21	22	23	24	25	26	27
N-1 校验结果	1	1	1	1	—	1	1	1	1
馈线编号	28	29	30	31	32	33	34	35	36
N-1 校验结果	1	1	1	1	1	1	1	1	1
馈线编号	37	38	39	40	41	42	43	44	
N-1 校验结果	1	1	1	1	1	1	1	1	

注: “1”表示通过, “0”表示不通过, “—”表示临界状态

表 3 主变 N-1 结果表

Table 3 Result of transformer N-1 verification

主变编号	1	2	3	4	5	6	7	8
主变 N-1	1	1	1	—	1	1	1	1

注: “1”表示通过, “0”表示不通过, “—”表示临界状态

任取安全域外的工作点。取  $F_{28}=2.00$  MVA, 其他馈线负荷保持在 TSC 允许负荷, 得到工作点 2, 对其进行 N-1 安全性校验, 校验结果见表 4 和表 5。

由表 4 和表 5 可知, 当取该安全域外的点时, 馈线 9 故障和主变 5 故障校验不通过。还存在多个馈线和主变 N-1 校验不通过的情况, 不通过的故障个数与工作点的负荷大小和分布有关。

表 4 线路 N-1 结果表

Table 4 Result of feeder N-1 verification

馈线编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N-1 校验结果	1	1	1	1	1	1	1	1	0
馈线编号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
N-1 校验结果	1	1	1	1	1	1	1	1	1
馈线编号	19	20	21	22	23	24	25	26	27
N-1 校验结果	1	1	1	1	1	1	1	1	1
馈线编号	28	29	30	31	32	33	34	35	36
N-1 校验结果	1	1	1	1	1	1	1	1	1
馈线编号	37	38	39	40	41	42	43	44	
N-1 校验结果	1	1	1	1	1	1	1	1	

注: “1”表示通过, “0”表示不通过, “—”表示临界状态

表 5 主变 N-1 结果表

Table 5 Result of transformer N-1 verification

主变编号	1	2	3	4	5	6	7	8
主变 N-1	1	1	1	1	0	1	1	1

注: “1”表示通过, “0”表示不通过, “—”表示临界状态

论文中只各对一个工作点进行了说明, 实际上取任意工作点都能得到上述结论。可见, 模型求得的安全域边界与 N-1 仿真得到的安全边界吻合。

### 5.3.2 验证方法二

取满足 N-1 校验的工作点  $F_{20}=2.00$  MVA,  $F_{44}=2.00$  MVA 作为初始值, 其他馈线负荷保持在 TSC 点上,  $F_{20}$  固定在 2.00 MVA, 利用文献[17]给出的 N-1 仿真逼近法, 通过变步长逐步调整  $F_{44}$ , 逼近得到新的  $F_{44}=6.92$  MVA。从而得到新的工作点  $F_{20}=2.00$  MVA,  $F_{44}=6.92$  MVA, 将该工作点的负荷值代入安全域边界表达式中化简得到

$$B_{DSSR} = \begin{cases} 2.00+6.92 \leq 8.92 \\ 0 \leq 6.92 \leq 7.72 \\ 0 \leq 2.00 \leq 4.80 \end{cases} \quad (10)$$

式 (10) 中的  $2.00+6.92=8.92$  恰好满足  $8.92 \leq 8.92$  的要求, 可见该工作点位于超平面边界上。采用不同工作点反复验证均发现 N-1 仿真逐点逼近求得的边界点位于本文模型边界上。

上述两种验证方法的结果充分说明, 本文模型求解的安全域边界可以经得起传统 N-1 仿真法的验证, 模型是精确的。

## 6 结论

本文提出了基于馈线互联关系的配电网安全域 DSSR 模型以及安全域边界的解析算法。本文模型

和算法比现有基于主变互联的模型更精确,表现在:

(1) 描述了馈线间分段、联络的详细拓扑关系,同时反映了主变和馈线间的互联关系,而现有方法只反映了主变间的互联关系。

(2) 同时计及主变  $N-1$  和馈线  $N-1$  故障,而现有方法只计及主变  $N-1$  故障。

(3) 计算结果更详实,包括主变、馈线出口以及馈线段的负荷,而现有方法只能给出主变负荷。

(4) 模型可用于有多联络的复杂配电网结构。

为验证模型的精确性,设计了两种  $N-1$  仿真的验证方法。结果显示,所得安全边界上的工作点都是  $N-1$  校验通过的临界点,即本文方法是准确的。

本文方法能解析描述配电网的安全边界,这样才能将系统运行到接近安全边界处,实现在满足安全条件下大大提高电网利用率的目的。本文方法比

$N-1$  仿真的速度大幅提高,能够直接解析得出安全边界,同时计及主变  $N-1$  和馈线  $N-1$  约束又保证了精确性,为未来的配电调度运行的在线安全监视和预防性控制奠定了基础。此外,更精确地计算安全域边界,对于负荷增长不大的现有电网改造和近期规划也具有意义,可以通过优化安全域的几何形状优化网络架构,更充分利用现有网络消纳新增负荷。

分段开关的位置数量、配电自动化配置、电压约束和损耗以及不同用户对可靠性不同的要求等因素都会影响配电系统安全域的计算。后续研究可以进一步考虑这些因素,提高模型的精确性,以更接近实际配电网。

本论文成果已申请专利,专利申请号: 201310300505.5。

附录 A

算例电网安全域边界的完整表达式

编号	安全边界表达式
1	$F_1 \leq \min(RF - (F_{45} + F_{21}), R_5 - (F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{45} + F_{46}) - (F_2 + F_3))$
2	$F_2 \leq \min(RF - (F_{22} + F_{46}), R_5 - (F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{45} + F_{46}) - (F_1 + F_3))$
3	$F_3 \leq \min(RF - F_{23}, R_5 - (F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{45} + F_{46}) - (F_1 + F_2))$
4	$F_4 \leq \min(RF - F_{28}, R_6 - (F_{27} + F_{28} + F_{29} + F_{30} + F_{31} + F_{32}))$
5	$F_5 \leq \min(RF - F_6, R_2 - (F_6 + F_7 + F_8 + F_9 + F_{10}))$
6	$F_6 \leq \min(RF - F_5, R_1 - (F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5))$
7	$F_7 \leq \min(RF - F_{24}, R_5 - (F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{45} + F_{46}) - F_8)$
8	$F_8 \leq \min(RF - F_{25}, R_5 - (F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{45} + F_{46}) - F_7)$
9	$F_9 \leq \min(RF - F_{30}, R_6 - (F_{27} + F_{28} + F_{29} + F_{30} + F_{31} + F_{32}))$
10	$F_{10} \leq \min(RF - F_{11}, R_3 - (F_{11} + F_{12} + F_{13} + F_{14} + F_{15}))$
11	$F_{11} \leq \min(RF - F_{10}, R_2 - (F_6 + F_7 + F_8 + F_9 + F_{10}))$
12	$F_{12} \leq \min(RF - F_{21}, R_5 - (F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{45} + F_{46}) - F_{13})$
13	$F_{13} \leq \min(RF - F_{22}, R_5 - (F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{45} + F_{46}) - F_{12})$
14	$F_{14} \leq \min(RF - F_{36}, R_7 - (F_{33} + F_{34} + F_{35} + F_{36} + F_{37} + F_{38} + F_{47}))$
15	$F_{15} \leq \min(RF - F_{16}, R_7 - (F_{16} + F_{17} + F_{18} + F_{19} + F_{20}))$
16	$F_{16} \leq \min(RF - F_{15}, R_7 - (F_{11} + F_{12} + F_{13} + F_{14} + F_{15}))$
17	$F_{17} \leq \min(RF - F_{41}, R_8 - (F_{39} + F_{40} + F_{41} + F_{42} + F_{43} + F_{44} + F_{48}) - (F_{18} + F_{19} + F_{20}))$
18	$F_{18} \leq \min(RF - F_{42}, R_8 - (F_{39} + F_{40} + F_{41} + F_{42} + F_{43} + F_{44} + F_{48}) - (F_{17} + F_{19} + F_{20}))$
19	$F_{19} \leq \min(RF - F_{43}, R_8 - (F_{39} + F_{40} + F_{41} + F_{42} + F_{43} + F_{44} + F_{48}) - (F_{17} + F_{18} + F_{20}))$
20	$F_{20} \leq \min(RF - F_{44}, R_8 - (F_{39} + F_{40} + F_{41} + F_{42} + F_{43} + F_{44} + F_{48}) - (F_{17} + F_{18} + F_{19}))$
21	$F_{21} \leq \min(RF - F_{12}, R_3 - (F_{11} + F_{12} + F_{13} + F_{14} + F_{15}) - F_{22})$
22	$F_{22} \leq \min(RF - F_{13}, R_3 - (F_{11} + F_{12} + F_{13} + F_{14} + F_{15}) - F_{21})$
23	$F_{23} \leq \min(RF - F_3, R_3 - (F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5) - (F_{45} + F_{46}))$
24	$F_{24} \leq \min(RF - F_7, R_2 - (F_6 + F_7 + F_8 + F_9 + F_{10}) - F_{25})$
25	$F_{25} \leq \min(RF - F_8, R_2 - (F_6 + F_7 + F_8 + F_9 + F_{10}) - F_{24})$
26	$F_{26} \leq \min(RF - F_{27}, R_6 - (F_{27} + F_{28} + F_{29} + F_{30} + F_{31} + F_{32}))$

编号	安全边界表达式
27	$F_{27} \leq \min(RF - F_{26}, R_5 - (F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} + F_{26}))$
28	$F_{28} \leq \min(RF - F_{35}, R_7 - (F_{33} + F_{34} + F_{35} + F_{36} + F_{37} + F_{38}))$
29	$F_{29} \leq \min(RF - (F_{48} + F_{41}), R_8 - (F_{39} + F_{40} + F_{41} + F_{42} + F_{43} + F_{44}))$
30	$F_{30} \leq \min(RF - F_9, R_2 - (F_6 + F_7 + F_8 + F_9 + F_{10}))$
31	$F_{31} \leq \min(RF - F_{34}, R_7 - (F_{33} + F_{34} + F_{35} + F_{36} + F_{37} + F_{38}) - F_{32})$
32	$F_{32} \leq \min(RF - F_{33}, R_7 - (F_{33} + F_{34} + F_{35} + F_{36} + F_{37} + F_{38}) - F_{31})$
33	$F_{33} \leq \min(RF - F_{32}, R_6 - (F_{27} + F_{28} + F_{29} + F_{30} + F_{31} + F_{32}) - (F_{34} + F_{35}))$
34	$F_{34} \leq \min(RF - F_{31}, R_6 - (F_{27} + F_{28} + F_{29} + F_{30} + F_{31} + F_{32}) - (F_{33} + F_{35}))$
35	$F_{35} \leq \min(RF - F_{28}, R_6 - (F_{27} + F_{28} + F_{29} + F_{30} + F_{31} + F_{32}) - (F_{33} + F_{34}))$
36	$F_{36} \leq \min(RF - F_{14}, R_3 - (F_{11} + F_{12} + F_{13} + F_{14} + F_{15}))$
37	$F_{37} \leq \min(RF - F_{40}, R_8 - (F_{39} + F_{40} + F_{41} + F_{42} + F_{43} + F_{44} + F_{48}) - F_{38})$
38	$F_{38} \leq \min(RF - F_{39}, R_8 - (F_{39} + F_{40} + F_{41} + F_{42} + F_{43} + F_{44} + F_{48}) - F_{37})$
39	$F_{39} \leq \min(RF - F_{38}, R_7 - (F_{33} + F_{34} + F_{35} + F_{36} + F_{37} + F_{38} + F_{47}) - F_{40})$
40	$F_{40} \leq \min(RF - F_{37}, R_7 - (F_{33} + F_{34} + F_{35} + F_{36} + F_{37} + F_{38} + F_{47}) - F_{39})$
41	$F_{41} \leq \min(RF - F_{17}, R_4 - (F_{16} + F_{17} + F_{18} + F_{19} + F_{20}) - (F_{42} + F_{43} + F_{44}))$
42	$F_{42} \leq \min(RF - F_{18}, R_4 - (F_{16} + F_{17} + F_{18} + F_{19} + F_{20}) - (F_{41} + F_{43} + F_{44}))$
43	$F_{43} \leq \min(RF - F_{19}, R_4 - (F_{16} + F_{17} + F_{18} + F_{19} + F_{20}) - (F_{41} + F_{42} + F_{44}))$
44	$F_{44} \leq \min(RF - F_{20}, R_4 - (F_{16} + F_{17} + F_{18} + F_{19} + F_{20}) - (F_{41} + F_{42} + F_{43}))$
45	$F_{45} \leq \min(RF - F_1, R_1 - (F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5) - (F_{23} + F_{46}))$
46	$F_{46} \leq \min(RF - F_2, R_1 - (F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_{47}) - (F_{23} + F_{45}))$
47	$F_{47} \leq \min(RF - F_{35}, R_7 - (F_{33} + F_{34} + F_{35} + F_{36} + F_{37} + F_{38}))$
48	$F_{48} \leq \min(RF - F_{29}, R_6 - (F_{27} + F_{28} + F_{29} + F_{30} + F_{31} + F_{32}))$

## 参考文献

- [1] 肖峻, 李振生, 张跃. 基于最大供电能力的智能配电网规划与运行新思路[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 8-14.  
XIAO Jun, LI Zhensheng, ZHANG Yue. A novel planning and operation mode for smart distribution networks based on total supply capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 8-14.
- [2] WU F F, KUMAGAI S. Steady-state security regions of power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1982, 29(11): 703-711.
- [3] 王娜娜, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于断面潮流的大电网实用小扰动稳定域[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 43-48.  
WANG Nana, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Practical small signal stability region of large power grid based on interface power flow[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 43-48.
- [4] 王曦冉, 章敏捷, 邓敏, 等. 基于动态安全域的最优时间紧急控制策略算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 71-77.  
WANG Xiran, ZHANG Minjie, DENG Min, et al. Optimal emergency control strategy algorithm of ideal time based on dynamic security region[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 71-77.
- [5] 余贻鑫. 安全域的方法学及实用性结果[J]. 天津大学学报, 2003, 36(5): 525-528.  
YU Yixin. Methodology of security region and practical results[J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(5): 525-528.
- [6] 肖峻, 贺琪博, 苏步芸. 基于安全域的智能配电网安全高效运行模式[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 52-60.  
XIAO Jun, HE Qibo, SU Buyun. A secure and efficient operation mode for smart distribution networks based on security region[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 52-60.
- [7] 肖峻, 谷文卓, 郭晓丹, 等. 配电系统供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 47-52.  
XIAO Jun, GU Wenzhuo, GUO Xiaodan, et al. Total supply capability model for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 47-52.

- [8] 葛少云, 何文涛, 刘洪, 等. 中压配电系统供电模型综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 104-109.  
GE Shaoyun, HE Wentao, LIU Hong, et al. Comprehensive evaluation of power supply model of medium voltage distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 104-109.
- [9] 王成山, 罗凤章, 肖峻, 等. 基于主变互联关系的配电系统供电能力计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 86-91.  
WANG Chengshan, LUO Fengzhang, XIAO Jun, et al. An evaluation method for power supply capability of distribution system based on analyzing interconnections of main transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 86-91.
- [10] 马静, 马伟, 王增平. 基于联络关系的主变故障负荷转供方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 1-7.  
MA Jing, MA Wei, WANG Zengping. Power restoration scheme for main transformer fault based on the interconnection relationship[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 1-7.
- [11] 葛少云, 韩俊, 刘洪, 等. 计及主变过载和联络容量约束的配电系统供电能力计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 97-103.  
GE Shaoyun, HAN Jun, LIU Hong, et al. Power supply capability determination considering constraints of transformer overloading and tie-line capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 97-103.
- [12] 刘健, 司玉芳. 考虑负荷变化的配电网架安全评估及其应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 70-75.  
LIU Jian, SI Yufang. Safety evaluation and its application of distribution grids considering load variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 70-75.
- [13] 肖峻, 谷文卓, 王成山. 基于馈线互联关系的配电网最大供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 72-77.  
XIAO Jun, GU Wenzhuo, WANG Chengshan. A total supply capability model for power distribution network based on feeders interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 72-77.
- [14] 肖峻, 谷文卓, 王成山. 面向智能配电系统的安全域模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 14-19.  
XIAO Jun, GU Wenzhuo, WANG Chengshan. Model of distribution system security region (DSSR) for smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 14-19.
- [15] XIAO J, GU W Z, WANG C S. Distribution system security region: definition, model and security assessment[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(10): 1029-1035.
- [16] 肖峻, 贡晓旭, 王成山. 配电网最大供电能力与  $N-1$  安全校验的对比较验证[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 86-91.  
XIAO Jun, GONG Xiaoxu, WANG Chengshan. Comparative research between total supply capability and  $N-1$  security verification for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 86-91.
- [17] 余贻鑫, 栾文鹏. 利用拟合技术决定实用电力系统动态安全域[J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(增刊1): 22-28.  
YU Yixin, LUAN Wenpeng. Practical dynamic security of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1990, 10(S1): 22-28.
- [18] 肖峻, 贡晓旭, 王成山. 智能配电网  $N-1$  安全边界拓扑性质及边界算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 545-554.  
XIAO Jun, GONG Xiaoxu, WANG Chengshan. Topology properties and algorithm of  $N-1$  security boundary for smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 545-554.
- [19] 肖峻, 李振生, 刘世嵩. 电压约束及网损对配电网最大供电能力计算的影响[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 36-43.  
XIAO Jun, LI Zhensheng, LIU Shisong. The impact of voltage constraints and losses on total supply capability calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 36-43.

收稿日期: 2015-01-12; 修回日期: 2015-02-16

作者简介:

肖峻(1971-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要从事城市电网、微网的规划研究和应用工作; E-mail: xiaojun@tju.edu.cn

苏步芸(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事城市配电网规划方面的研究应用工作; E-mail: subuyun@tju.edu.cn

贡晓旭(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事配电网安全评估方面的研究工作; E-mail: gongxiaoxu01@163.com

(编辑 魏小丽)