

## 配电系统供电能力模型

肖峻<sup>1</sup>, 谷文卓<sup>1</sup>, 郭晓丹<sup>1</sup>, 王成山<sup>1</sup>, 李方兴<sup>2</sup>

(1. 智能电网教育部重点实验室, 天津大学, 天津市 300072; 2. University of Tennessee, Knoxville 37996, 美国)

**摘要:** 提出了一种新的配电系统供电能力数学模型。首先, 基于  $N-1$  安全准则给出了包括配电系统最大供电能力、变电站供电能力、网络转移能力和可用供电能力等供电能力相关指标的定义。其次, 建立了最大供电能力模型, 该模型分为最大供电能力子模型和负载均衡子模型, 将其转化为线性规划问题后, 逐次求解得到最大供电能力并达到主变压器负载均衡分配。最后, 通过算例验证了模型的有效性, 提高了解析计算最大供电能力方法的精度。

**关键词:** 配电系统; 最大供电能力;  $N-1$  安全准则; 指标; 负载均衡

### 0 引言

在城市地区, 从配电系统的规划与改建中获得新变电站的站址和新馈线的地下通道是非常困难的。因此, 现有电网的供电能力和优化后的潜力受到越来越多的关注, 供电能力也逐渐成为评价配电网的一个新指标。同时, 在中国这样快速崛起并发展的国家, 由于配电系统的迅速扩张, 计算评估现有配电系统供电能力和规划未来配电系统的供电能力都是十分必要的<sup>[1]</sup>。

配电网供电能力的研究经历了以下 3 个阶段。

1) 以变电容量评估配电系统供电能力的阶段, 如容载比法<sup>[2]</sup>。该阶段以变电站的变电容量为主要依据, 从宏观上评价了电网供电能力的大小, 这类方法计算简单, 但没详细考虑变电站下级配电网对供电能力的作用。

2) 网络供电能力计算阶段, 如最大负荷倍数法<sup>[3]</sup>、网络最大流法<sup>[4]</sup>、负荷能力法<sup>[5]</sup>。该阶段方法考查变电站变电容量的同时, 把馈线作为电网供电能力计算的依据, 提出了网络转移供电能力计算的思想, 但仅以馈线负荷来估计网络转移供电能力是不合理的, 它忽略了变电站对供电能力的影响。而负荷能力方法是计算配电网辐射运行时满足支路潮流和节点电压约束的最大负荷能力, 并没有考虑到  $N-1$  安全准则条件下负荷转供的情况。

3) 计及  $N-1$  安全准则, 将变电站供电能力、网络转供能力相结合的计算供电能力阶段。文献<sup>[6]</sup>提出了基于  $N-1$  安全准则下负荷转移的供电恢复能力指标, 该方法侧重于对电网运行方式供电恢复

能力的评估, 并不能直接计算最大供电能力。文献<sup>[7-8]</sup>提出能够计算  $N-1$  安全准则条件下的配电网站内、网络转移供电能力的实用方法, 该方法未严格建立模型且其假定条件过于理想, 因此所得结果存在一定的误差。文献<sup>[9]</sup>建立了供电能力数学模型, 并利用线性规划软件 Lingo 求解, 增加了计算的准确性, 但其所建模型以变电站为最小单位, 计算结果存在多种可能性, 与实际存在一定的差距。

本文借鉴输电系统的最大传输能力等概念<sup>[9]</sup>, 系统地建立了供电能力相关概念的定义和模型, 并解决了供电能力的精确计算问题。

### 1 基本概念

**定义 1** 最大供电能力是指一定供电区域内配电网满足  $N-1$  安全准则, 且考虑到网络实际运行情况下的最大负荷供应能力<sup>[7-8,10]</sup>。定义向量  $T_{TSC}$  为达到最大供电能力时各主变压器(简称主变)的负载率, 其中某台主变的负载率为  $T_{TSCi}$ 。

**定义 2** 可用供电能力是指在保证  $N-1$  安全准则条件下, 一定的供电区域内配电网在现有负荷基础上可以增加的供电能力<sup>[10]</sup>, 即

$$A_{ASC} = A_{TSC} - L_d \quad (1)$$

式中:  $A_{ASC}$  为可用供电能力;  $A_{TSC}$  为最大供电能力;  $L_d$  为配电系统现有的全部负荷。

定义可用主变负载率  $T_{ASCi}$  为配电系统在满足  $N-1$  安全准则时某台变压器可以增加的负载率, 即

$$T_{ASCi} = T_{TSCi} - T_i \quad (2)$$

式中:  $T_i$  为变压器  $i$  的现有负载率。

配电系统最大供电能力受到 2 个因素影响, 即各变电站主变容量配置和变电站主变间的联络。根据联络的位置, 可将其分为同一站内 2 台主变的站

收稿日期: 2011-03-25; 修回日期: 2011-07-28。  
国家自然科学基金资助项目(50977060)。

内联络和不同站 2 台主变的站间联络<sup>[8]</sup>。变电站主变配置及主接线结构决定了站内联络,一般来说,站内联络总是存在且容量足够大,能够支持主变负荷与同一站内其他主变的转移是畅通且可均分的。本文重点研究站间联络的作用。站间联络是由变电站下级出线及其馈线间联络线组成,构成了保证在  $N-1$  安全准则下的变压器负荷转移通道。配电网网络结构决定了联络的情况。

**定义 3** 变电站供电能力是指一定供电区域内配电网变电站容量配置及站内联络提供的供电能力,等于在无任何站间联络时的最大供电能力。

值得指出的是,变电站供电能力正好对应了传统仅仅依靠变电站内主变互相转供的规划导则中的容载比概念。当配电系统不存在站间联络(或调度运行中不利用站间联络转移变电站负荷)时,系统最大供电能力将达到最低值。

**定义 4** 网络转移能力是指一定供电区域内的配电网通过增加站间联络而新获得的供电能力。

配电系统最大供电能力为变电站供电能力与网络转移能力之和,即

$$A_{TSC} = A_{SSC} + A_{NTC} \quad (3)$$

式中:  $A_{SSC}$  为变电站供电能力;  $A_{NTC}$  为网络转移能力。

**定义 5** 全联络供电能力是指一定供电区域内配电网所有主变两两互联,即系统达到全联络且联络容量足够大时的最大供电能力。

在现有配电网的基础上,增加变电站和变压器的数量、容量,则可提升变电站供电能力;增加站间联络的数量和容量,则可提升网络转移能力;显然后者更加经济。

**定义 6** 可扩展供电能力是指一定供电区域内配电网通过增加变电站间联络的数量和容量,至全联络且联络容量足够大时所新获得的供电能力,即

$$A_{ESC} = A_{MSC} - A_{TSC} \quad (4)$$

式中:  $A_{ESC}$  为可扩展供电能力;  $A_{MSC}$  为全联络供电能力。

定义  $\eta_{ESC}$  为  $A_{ESC}$  与  $A_{SSC}$  的比率,即

$$\eta_{ESC} = \frac{A_{ESC}}{A_{SSC}} \times 100\% \quad (5)$$

当网络中没有站间联络,即网络转移能力为 0 时,可扩展供电能力达到最大值,定义其为最大可扩展供电能力  $A_{ESCmax}$ ,即

$$A_{ESCmax} = A_{MSC} - A_{SSC} \quad (6)$$

同理,  $\eta_{ESCmax}$  为:

$$\eta_{ESCmax} = \frac{A_{MSC} - A_{SSC}}{A_{SSC}} \times 100\% \quad (7)$$

$A_{ESCmax}$  等于全联络且联络容量足够大时的网络转移能力,此时网络转移能力达到最大值  $A_{NTCmax}$ ,因此,

$$\eta_{ESCmax} = \frac{A_{NTCmax}}{A_{SSC}} \times 100\% \quad (8)$$

全联络供电能力和可扩展供电能力的概念对于挖掘一个配电网的供电潜力具有重要作用。

## 2 最大供电能力模型

第 1 节建立了供电能力指标族,其中最大供电能力是所有其他指标的基础,一旦计算得到最大供电能力,其余指标便不难计算。本节将给出最大供电能力的数学模型和计算方法。

最大供电能力模型包括 2 部分:模型 1 为最大供电能力模型,目的是计算配电系统的最大供电能力,最大供电能力就是模型的目标函数;模型 2 为负载均衡模型,目的是保证在系统达到最大供电能力的基础上,各主变负载能均衡分配,该模型以主变负载均衡度为目标函数。

本文模型采用线性规划软件精确求解,需将模型转换为线性规划模型,即可输入线性规划软件的形式,因此区分称为原始模型和线性规划模型。

### 2.1 数学模型 1——最大供电能力模型

#### 2.1.1 最大供电能力的原始模型

模型 1 以最大供电能力为目标函数,依据最大供电能力定义,计及  $N-1$  安全准则条件下的负荷转带,并考虑网络实际运行情况,包括主变容量、网络拓扑结构、主变短时允许过载系数、联络极限容量等约束。由于城市配电网线路较短,转带后电压不难满足要求,故模型中忽略电压约束。

对于一个含多个互联变电站的配电网整体来说,其满足  $N-1$  安全准则的最大供电能力为:

$$\max A_{TSC} = \sum R_i T_i \quad (9)$$

式中:  $R_i$  为主变  $i$  的额定容量;  $T_i$  为主变  $i$  的负载率。

约束条件包括:

#### 1) 负荷转带等式约束

$$R_i T_i = \sum_{j \in \Omega_1^{(i)}} B_{i,j} + \sum_{j \in \Omega_2^{(i)}} B_{i,j} \quad \forall i \quad (10)$$

式中:  $B_{i,j}$  为主变  $i$  故障时向主变  $j$  转移负荷的大小;  $\Omega_1^{(i)}$  和  $\Omega_2^{(i)}$  分别为与主变  $i$  站内联络的主变集合和站外联络的主变集合。

式(10)表示主变  $i$  故障时,事故前主变  $i$  正常所带负荷由站内其余主变和其他站联络主变共同转带。

2)内负荷转带约束

$$B_{i,j} + R_j T_j \leq k R_j \quad \forall i, j \in \Omega_1^{(i)} \quad (11)$$

式中:  $R_j$  为主变  $j$  的额定容量;  $T_j$  为主变  $j$  的负载率;  $k$  为主变短时允许过载系数, 可取 1.0 或 1.3。

式(11)表示站内主变  $j$  接受故障主变  $i$  转移负荷后, 所供负荷不超过额定容量的  $k$  倍。

3)站间负荷转带约束

$$B_{i,j} + R_j T_j \leq R_j \quad \forall i, j \in \Omega_2^{(i)} \quad (12)$$

式(12)表示站外联络主变  $j$  接受故障主变  $i$  的转移负荷后不过负荷, 由于导则只规定了站内主变互相转带时短时允许过载, 因此本文在站间转带时不考虑  $k$ ,  $k$  取 1.0。

4)联络容量约束

$$B_{i,j} \leq C_{i,j} \quad \forall i, j \in \Omega_1^{(i)} \cup \Omega_2^{(i)} \quad (13)$$

式中:  $C_{i,j}$  为主变  $i$  与主变  $j$  间联络的极限容量。

式(13)表示转移负荷不超过联络通路的极限容量。

5)主变负载率约束

$$T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} \quad \forall i \quad (14)$$

式中:  $T_{\min}$  和  $T_{\max}$  分别为主变  $i$  的最小和最大负载率。

式(14)表示主变负载率需要介于负载率上下限之间。本文取 0~0.95, 也可以增加约束, 指定某些已知负载率区间的主变。

6)区域负载约束

$$D \leq \sum_{i \in Z} R_i T_i \quad (15)$$

式中:  $D$  为区域给定负载;  $Z$  为该区域的所有主变集合。

这种区域是重载区, 在实际电网中很可能出现, 这些区域的大部分负荷无法转移到该区域以外电网。若有多个这样的区域, 增加相应的不等式约束即可。值得注意的是, 由于最大供电能力是计算供电负荷的最大值, 所以无需考虑轻载区约束。本文计算表明, 区域负载约束可能会减小整个区域电网的供电能力, 其原因是破坏了负荷的平衡分配。

2.1.2 最大供电能力的线性规划模型

最大供电能力原始模型不能直接利用线性规划软件(如 Lingo)来求解, 还需对原始模型进行变形, 方法如下。

引入主变联络矩阵  $L'$  来统一表示站内主变与站外主变的互联关系。考虑站内转带短时允许过载系数  $k$  后,  $L'$  与站内联络矩阵  $L_{in}$  和站外联络矩阵  $L_{out}$  的关系为:

$$L' = k(L_{in} - I) + L_{out} + I \quad (16)$$

式中:  $I$  为单位矩阵。

矩阵  $R$  各元素  $R_i$  为联络中心主变  $i$  的额定容量, 按式(17)对矩阵  $R$  进行修正。

$$R' = L'R \quad (17)$$

式中: 矩阵  $R'$  中元素  $R_j'$  为考虑  $k$  后的主变  $j$  最大允许容量。

最大供电能力原始模型转换得到的线性规划模型为:

$$\max A_{TSC} = \sum R_i T_i \quad (18)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} R_i T_i = \sum_{i=1}^{N_S} L_{i,j} B_{i,j} \\ L_{i,j} (B_{i,j} + R_j T_j) \leq R_j' \\ B_{i,j} \leq C_{i,j} \\ T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} \\ D \leq \sum_{i \in Z} R_i T_i \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $N_S$  为系统中的主变数量;  $L_{i,j}$  表示第  $i$  台主变与第  $j$  台主变间的联络关系, 存在联络关系时  $L_{i,j}=1$ , 否则  $L_{i,j}=0$ 。

其中,  $L_{i,j} (B_{i,j} + R_j T_j) \leq R_j'$  为负荷转带约束, 源自原始模型中的式(11)和式(12), 表示主变  $i$  在  $N-1$  安全准则条件下, 向主变  $j$  转移的负荷与主变  $j$  所带负荷之和, 应不大于考虑短时过载系数  $k$  的主变  $j$  最大允许容量。其余约束源自原始模型中的式(10)和式(13)一式(15)。

2.2 数学模型 2——负载均衡模型

2.2.1 负载均衡的原始模型

求解模型 1 得到最大供电能力时并不能保证各主变负载较为均衡, 很多算例的某些主变负载率甚至会达到极值。其原因是绝大部分算例采用的模型 1 的最优解并不是唯一的, 而线性规划软件只能给出一个最优解。因此, 本文采用模型 2 进行进一步处理。

模型 2 以主变负载率均衡度为目标函数, 从规划和运行规划角度出发, 希望系统达到最大供电能力时, 各主变负载率的差异应尽可能低, 不出现过大或过小的情况。因此, 本文将配电系统各主变负载率的方差定义为主变负载率均衡度  $V_{VLR}$ , 用来表示各主变负载率的差异。而将模型 1 求解得到的最大供电能力作为约束条件, 以主变负载率均衡度为目标函数建立数学模型, 保证同等最大供电能力下各主变负载率差异最小, 模型 2 可表示为:

$$\min V_{VLR} = \frac{\sum (T_i - \bar{T})^2}{N_S} \quad (20)$$

式中:  $\bar{T}$  为各主变负载率的平均值。

式(20)表示所有主变满足  $N-1$  安全准则且达

到系统最大供电能力时,各主变负载率的方差最小。

约束条件为:

$$\begin{cases} R_i T_i = \sum_{j \in \Omega_1^{(i)}} B_{i,j} + \sum_{j \in \Omega_2^{(i)}} B_{i,j} & \forall i \\ B_{i,j} + R_j T_j \leq k R_j & \forall i, j \in \Omega_1^{(i)} \\ B_{i,j} + R_j T_j \leq R_j & \forall i, j \in \Omega_2^{(i)} \\ B_{i,j} \leq C_{i,j} & \forall i, j \in \Omega_1^{(i)} \cup \Omega_2^{(i)} \\ T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} & \forall i \\ D \leq \sum_{i \in Z} R_i T_i \\ \sum R_i T_i = A_{TSC} \end{cases} \quad (21)$$

式(21)中  $\sum R_i T_i = A_{TSC}$  为供电能力约束,系统最大供电能力  $A_{TSC}$  为已知值,即模型 1 的计算结果。实际中也可以采用不等式约束,让  $\sum R_i T_i \geq A_{TSC} \alpha$  ( $\alpha$  为系数) 后的值,在稍微降低供电能力的条件下,追求更好的负载率均衡度,此时需要用  $\sum R_i T_i$  的计算结果重新得到  $A_{TSC}$ 。

### 2.2.2 负载均衡的线性规划模型

将负载均衡原始模型转化为可输入线性规划软件的形式,即

$$\begin{aligned} \min V_{VLR} &= \frac{\sum (T_i - \bar{T})^2}{N_\Sigma} & (22) \\ \text{s. t.} & \begin{cases} R_i T_i = \sum_{i=1}^{N_\Sigma} L_{i,j} B_{i,j} \\ L_{i,j} (B_{i,j} + R_j T_j) \leq R_j' \\ B_{i,j} \leq C_{i,j} \\ T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} \\ D \leq \sum_{i \in Z} R_i T_i \\ \sum R_i T_i = A_{TSC} \end{cases} & (23) \end{aligned}$$

## 3 算例分析

### 3.1 算例基本情况

算例的配电网示意图如图 1 所示。图中,数字 1—44 为节点编号。

算例电网的变电站和联络数据如表 1 和表 2 所示。配电网主干线路导体线型均为 JKLYJ-185。

### 3.2 算例结果与分析

根据式(18)一式(23)并采用 Lingo 计算得到  $A_{TSC}$ ,再利用式(1)一式(8)计算其余指标,所得结果如下:最大供电能力  $A_{TSC}$  为 211.2 MVA,可用供电能力  $A_{ASC}$  为 49.2 MVA,变电站供电能力  $A_{SSC}$  为 143 MVA,网络转移能力  $A_{NTC}$  为 68.2 MVA,全联

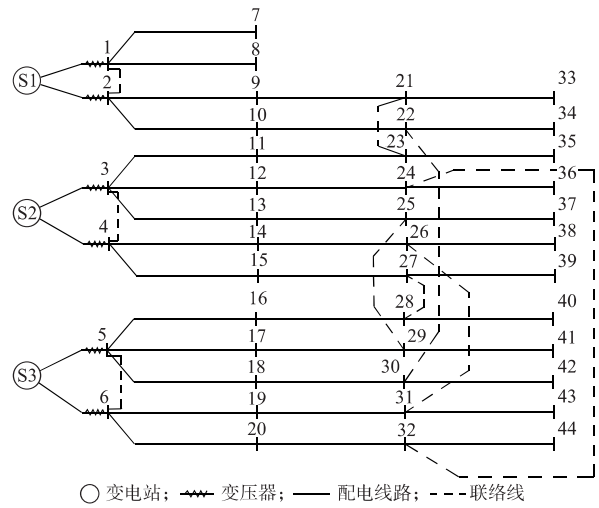


图 1 算例网络  
Fig. 1 Example network

表 1 变电站主变数据  
Tab. 1 Data of substation main transformers

变电站	主变压器	变比/(kV · kV <sup>-1</sup> )	容量/MVA	负荷/MVA
S1	1	35/10	40	20
	2	35/10	40	25
S2	3	35/10	40	15
	4	35/10	40	30
S3	5	110/10	63	30
	6	110/10	63	42

表 2 联络导线容量数据  
Tab. 2 Capacity data of contact wires

联络	导体线型	导体允许容量/MVA
21-23	JKLV-120	6.35
22-30	JKLYJ-185	11.30
25-29	JKLYJ-120	7.64
24-32	JKLYJ-70	4.43
27-28	JKLYJ-150	8.83
26-31	JKLYJ-95	6.02

络供电能力  $A_{MSC}$  为 223 MVA,可扩展供电能力  $A_{ESC}$  为 11.8 MVA,可扩展供电能力比率  $\eta_{ESC}$  为 8.25,最大可扩展供电能力  $A_{ESCmax}$  为 80 MVA,最大可扩展供电能力比率  $\eta_{ESCmax}$  为 55.94。计算中主变短时允许过载系数  $k$  取 1.0。

### 3.2.1 最大供电能力

该网络的最大供电能力为 211.2 MVA,将此作为模型 2 的已知条件,并用线性规划软件求解,可得达到最大供电能力的最均衡分配的主变负载率向量  $T_{TSC} = [0.650, 0.650, 0.836, 0.836, 0.733, 0.733]$ 。

### 3.2.2 可用供电能力

算例的可用供电能力可由式(1)算出,为 49.2 MVA,可用变压器负载率可由式(2)算出,有

$T_{ASC} = [0.150, 0.025, 0.465, 0.082, 0.264, 0.059]$ 。配电系统的可用供电能力与可用变压器负载率表示其与  $N-1$  安全准则下安全边界的距离。当前数据显示主变 2 与主变 6 的负载距安全边界较近。有关配电系统的安全边界问题,本文不展开讨论。

### 3.2.3 变电站供电能力和网络转移能力

该网络供电能力为 211.2 MVA,由变电站供电能力和网络转移能力这 2 部分构成,其值分别为 143 MVA 和 68.20 MVA,各占 67.7%和 32.3%。需要指出的是,目前配电规划和运行中仅按照导则,利用站内主变  $N-1$  安全准则条件下的互供来确定主变最大负载率,而未利用网络转供提高主变负载率,此时的供电能力刚好等于变电站供电能力,即为 143 MVA。实际上,如果进一步利用网络转移能力,供电能力还有较大的潜力可挖。该算例的网络转移能力为 68.20 MVA,表示在不增加变电容量的基础上,提高现有负荷水平的 47.7%同样满足  $N-1$  安全准则,因此采用本文方法能够大幅度地减低新增电网投资,在现今城市资源紧缺、昂贵的情况下意义很大。当然,目前的网络转供操作时间过长,还不能与站内转供相比。配电自动化使得网络转供操作能够在较短时间(分钟级别即可)内完成。具备配电自动化的东京配电网在较低容载比下实现高可靠性的实际情况也证明了本文的上述研究结论。未来智能配电网的发展正好能够提供配电自动化这一条件,因此上述研究结果在智能电网背景下具有应用条件。

### 3.2.4 全联络供电能力和可扩展供电能力

当该网络达到全联络关系,且联络容量足够大时,最大供电能力达到最大值 223 MVA。在主变容量不变的情况下通过新增联络的可扩展供电能力  $A_{ESC}$  为 11.8 MVA,  $\eta_{ESC}$  为 8.25%。

该网络的最大可扩展供电能力最大值  $A_{ESCmax}$  为 80 MVA,  $\eta_{ESCmax}$  为 55.94%。该值表明通过建设网络到全联络后,最充分利用网络转供提高变电站负载率与完全不利用联络相比,理论上能够挖掘的最大供电潜力。更多算例计算表明,在  $k=1.0$  的情况下,  $\eta_{ESCmax}$  一般能够达到 50%以上;在  $k=1.3$  的情况下,  $\eta_{ESCmax}$  一般能够达到 30%以上。

本文在上述模型基础上,给出了精确计算供电能力的线性规划方法,并通过算例展示和验证了上述概念和计算方法。

### 3.3 最大供电能力计算精度和速度

本文结果与文献[7]比较发现,文献[7]方法存在一定的误差,篇幅限制,此处不再赘述。本文方法

计算速度较快,适用于大规模的实际配电网,对于 40 座变电站网络在 3.0 GHz CPU 和 1 GB 随机存取存储器的个人计算机环境下,全部结果耗时 2 s 左右。

## 4 结语

本文较完整地提出了与输电系统最大输电能力、最大传输能力指标族相对应的配电系统最大供电能力指标族;建立了最大供电能力的数学模型,并以主变负载率均衡度为目标函数建立负载均衡子模型,使计算结果更加符合实际。在上述模型基础上,给出了精确计算供电能力的线性规划方法,并通过算例成功进行了验证。

随着智能电网的发展,未来的高级配电自动化为快速网络负荷转移提供了条件,在此背景下,本文为充分挖掘配电系统供电潜力提供了方法。同时,由于高压配电网具有辐射运行情况,因此本文方法也不难适用于高压配电网。

## 参考文献

- [1] 肖峻,崔艳妍,王建民,等. 配电网规划的综合评价指标体系与方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(15):36-40.  
XIAO Jun, CUI Yanyan, WANG Jianmin, et al. Hierarchical performance assessment method on the distribution network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 36-40.
- [2] 李欣然,刘友强,朱湘友,等. 地区中压配电网容载比的研究[J]. 继电器,2006,34(7):47-50.  
LI Xinran, LIU Youqiang, ZHU Xiangyou, et al. Research on capacity-load ratio in district MV distribution networks[J]. Relay, 2006, 34(7): 47-50.
- [3] 汪卫华. 现有配电模式下配网供电能力研究[J]. 继电器,2007,35(14):13-16.  
WANG Weihua. Research on supply capability of distribution network under present distribution mode[J]. Relay, 2007, 35(14): 13-16.
- [4] 丘文千. 基于交流潮流模型的电网供电能力评价算法[J]. 浙江电力,2007,26(2):1-4.  
QIU Wenqian. Algorithm for evaluating power supply capability of power system based on AC power flow mode[J]. Zhejiang Electric Power, 2007, 26(2): 1-4.
- [5] KAREN N M, HSIAO-DONG C. Electric distribution system load capability: problem formulation, solution algorithm, and numerical results[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 436-442.
- [6] DENG Youman, CAI Le, NI Yixin. Algorithm for improving the restorability of power supply in distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(4): 1497-1502.
- [7] 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 transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 86-91.
- [8] LUO Fengzhang, WANG Chengshan, XIAO Jun, et al. Rapid evaluation method for power supply capability of urban distribution system based on  $N-1$  contingency analysis of main transformers[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32(10): 1063-1068.
- [9] 欧阳武,程浩忠,张秀彬,等.城市中压配电网最大供电能力评估方法[J].高电压技术,2009,35(2):403-407.  
OUYANG Wu, CHENG Haozhong, ZHANG Xiubin, et al. Evaluation method for maximum load capability of urban medium-voltage distribution system [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 403-407.
- [10] XIAO Jun, LI Fangxing, GU Wenzhuo, et al. Total supply capability and its extended indices for distribution systems: definition, model, calculation and applications [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(8): 869-876.

肖峻(1971—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:城市电网、微网的规划和应用。E-mail: xiaojun@tju.edu.cn

谷文卓(1988—),男,硕士研究生,主要研究方向:电网规划和应用。

郭晓丹(1988—),女,硕士研究生,主要研究方向:城市配电网规划和应用。

### A Supply Capability Model for Distribution Systems

XIAO Jun<sup>1</sup>, GU Wenzhuo<sup>1</sup>, GUO Xiaodan<sup>1</sup>, WANG Chengshan<sup>1</sup>, LI Fangxing<sup>2</sup>

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

2. University of Tennessee, Knoxville 37996, USA)

**Abstract:** A new supply capability model for distribution systems is proposed. Firstly, based on  $N-1$  safety criterion, definitions are given to the related indices including the distribution system maximum supply capability, substation supply capability, network transfer capability, available supply capability, etc. Then the maximum supply capability model is developed and divided into two parts, the maximum supply capability sub-model and the load balance sub-model. After the problem is transformed into one of linear programming, the maximum supply capability is obtained by step by step solution and the balanced distribution of the main transformer loads is attained. Finally, a case study is given to verify the effectiveness of the proposed model and improves the analytic calculation accuracy of the maximum supply capability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50977060).

**Key words:** distribution system; maximum supply capability;  $N-1$  safety criterion; indices; load balance

(上接第 16 页 continued from page 16)

### Uncertainty Analysis Based on Stochastic Response Surface Method in Power System Simulation

HAN Dong<sup>1</sup>, MA Jin<sup>2</sup>, HE Renmu<sup>2</sup>, GUO Runrui<sup>1</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control of Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Despite the advantage of stochastic response surface method (SRSM) in overcoming the drawback of repeated simulation required by the conventional method by quickly estimating response uncertainty with only small amounts of simulation, it is worth further investigation for application in power system simulation because of the system's complexity and characteristics of multi-dimensionality and strong nonlinearity. In order to enable the SRSM to find even wider application, by referring to the Monte Carlo simulation, an in-depth analysis is made of such problems as the selection of collocation points, parameter distribution in obedience to empirical probability or the uncertainty when random inputs are correlated. In addition, by consulting the trajectory sensitivity method, a parameter uncertainty analyzing strategy capable of dramatic reduction in the number of uncertain inputs is proposed. The efficiency and validity of the SRSM are shown by case study results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51077049, No. 51007086), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 20070079014), the Beijing Nova Program, and Program of Introducing Talents of Discipline to Universities ("111 Project") (No. B08013).

**Key words:** stochastic response surface method (SRSM); trajectory sensitivity method; uncertainty analysis; cumulative distribution function; Monte Carlo method; power system simulation