

DOI: 10.7667/PSPC160007

# 一种综合考虑馈线和主变约束的配电网主变 $N-1$ 校验方法

荆朝霞<sup>1</sup>, 李晓波<sup>1</sup>, 邬志峰<sup>2</sup>, 李柏新<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广州供电局有限公司番禺供电局, 广东 广州 511400)

**摘要:** 提出了一种可精确地进行配电网主变  $N-1$  校验的方法。全面地考虑配电网馈线和主变容量约束、实际运行约束和负荷转移约束, 并建立考虑站内转供的网络转供校验模型。该方法适用于配电网各种接线模式, 贴近实际网架情况。同时结合实际规划工作, 注重实用性。最后通过算例与现有相关研究进行对比, 验证所提校验方法的精确性。

**关键词:** 配电网; 主变压器;  $N-1$  校验; 差分进化算法

## A method of main-transformer $N-1$ verification for distribution network considering feeder and main-transformer constraints

JING Zhaoxia<sup>1</sup>, LI Xiaobo<sup>1</sup>, WU Zhifeng<sup>2</sup>, LI Boxin<sup>2</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Panyu Power Supply Bureau, Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

**Abstract:** This paper proposes an accurate method of main-transformer  $N-1$  verification for distribution network, considering the capacity constraints of feeder and main-transformer, practical operating constraints and load transfer constraints. The verification model of transferring the load of  $N-1$  main-transformer through closing normally open switches among feeders is established. This model also considers the situation that the load of  $N-1$  main-transformer is transferred to the other main-transformer within the same substation through the bus connecting the two main-transformers. Combined with the practical work of distribution network planning, the proposed method is applicable to various wiring modes of distribution network and close to the actual network structure. The accuracy of the proposed method is verified in comparison with existing relative methods.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377058).

**Key words:** distribution network; main-transformer;  $N-1$  verification; differential evolution algorithm

## 0 引言

在配电网规划、运行及检修等工作中, 都需要进行安全性校验与评估<sup>[1]</sup>。目前最常用的一种校验方法是  $N-1$  校验, 即校验在配电网发生单一元件故障后能否通过开关的开断保证系统的连续供电。

输电网  $N-1$  校验已有较成熟的模型和方法<sup>[2-3]</sup>, 由于配电网结构复杂, 需要考虑的实际因素众多, 目前专门用于配电网  $N-1$  校验的方法比较简单<sup>[4-5]</sup>, 尚未形成严格的数学模型。随着近年来对配电网规划和运行的重视, 一些考虑配电网  $N-1$  准则和实际约束的模型和方法逐渐被提出, 大体可分为两类。

一类基于详细网络模型和配电网潮流<sup>[6-8]</sup>, 可进行比较精细的分析, 但是由于配电网结构复杂、数据无法收集完整等原因<sup>[9]</sup>, 该方法较难在实际中应用<sup>[10]</sup>; 另一类方法结合配电网规划、运行的实际导则, 考虑网络拓扑模型、主变及馈线的联络关系以及容量等因素, 由于城市供电路径短, 电压降落和网络损耗均较小, 因此该方法不进行潮流计算<sup>[10-14]</sup>。

配电网  $N-1$  校验包括馈线  $N-1$  校验和主变  $N-1$  校验, 其中主变  $N-1$  故障所造成的影响最为严重, 且负荷转移情况最为复杂。文献[4]结合深度优先和广度优先的路径搜索方法进行配电网主变  $N-1$  校验分析, 文献[5]提出了基于启发式规则的快速配电网主变  $N-1$  校验方法。近年来在配电网供电能力评估中也广泛采用主变  $N-1$  准则<sup>[10-12]</sup>, 文献[10]简化配

电网络并提出了基于主变  $N-1$  准则的最大供电能力模型(TSC), 文献[11]在文献[10]的基础上考虑馈线  $N-1$  准则后提出了基于馈线互联关系的供电能力模型, 但在主变  $N-1$  校验方面两者都考虑不够全面。

本文在结合配电企业实际规划、运行工作的基础上, 发展一种综合考虑配电网馈线和主变容量约束、运行约束以及负荷转移约束的主变  $N-1$  校验方法。由于主变  $N-1$  校验时, 网络部分联络开关无法起到转供作用, 故本文采用预处理方式简化配电网, 使得主变  $N-1$  校验方法适用于配电网各种接线模式; 同时, 本文采用矩阵方式, 建立严格的网络转供校验模型, 使得主变  $N-1$  校验方法表达简洁, 并且可扩展性强。

### 1 本文主变 $N-1$ 校验方法的基本思路

主变  $N-1$  校验是在单一主变检修或故障情况下校验配电网的供电可靠性, 即校验能否通过站内其他主变或者站间联络馈线转带  $N-1$  主变上的所有负荷。一般规定在主变检修期间, 站内其他主变的最高负载率不能超过 100%; 在主变故障期间, 允许站内其他主变短时过载, 但负载率不能超过 120%。

结合配电网实际规划和运行工作, 本文提出的主变  $N-1$  校验方法主要有以下 3 个步骤, 详细的步骤说明将在接下来章节中进行介绍。为描述简便, 本文中称校验主变所带馈线为校验馈线, 联络馈线所接主变为联络主变。

- 1) 预处理: 去掉配电网无效联络开关, 初步确定必须由站内转供的校验馈线。
- 2) 建模: 建立考虑站内转供的网络转供校验模型, 并利用差分进化算法求解模型最优值。
- 3) 判断: 由模型最优解确定所有必须由站内转供的馈线, 重新求解校验模型, 从而判断主变能否通过  $N-1$  校验。

校验方法详细流程如图 1 所示。可以看出, 网络转供校验模型是整个校验方法的核心, 同时该模型考虑了单辐射校验馈线的转供, 即站内转供。

### 2 网络预处理

在对主变进行  $N-1$  校验时, 校验馈线上的某些联络开关无法起到转供作用(如校验馈线之间的联络开关), 因此需先对这些联络开关进行预处理。

文献[11]定义了主变联络单元: 配电网中校验主变以及与其具有联络关系的一组主变, 称之为以校验主变为中心的主变联络单元。

本文在主变联络单元概念的基础上, 进一步提出校验单元的概念: 以校验主变为中心的主变联络

单元、校验馈线以及与其联络的联络馈线共同构成以校验主变为中心的校验单元。图 2 给出了以校验主变 1#为中心的校验单元。

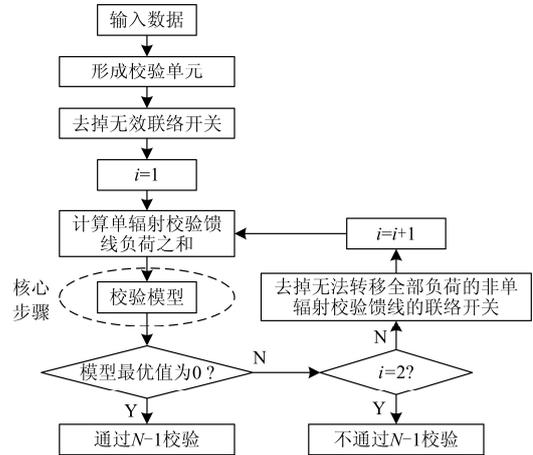


图 1 主变  $N-1$  校验流程图

Fig. 1 Flowchart of main-transformer  $N-1$  verification

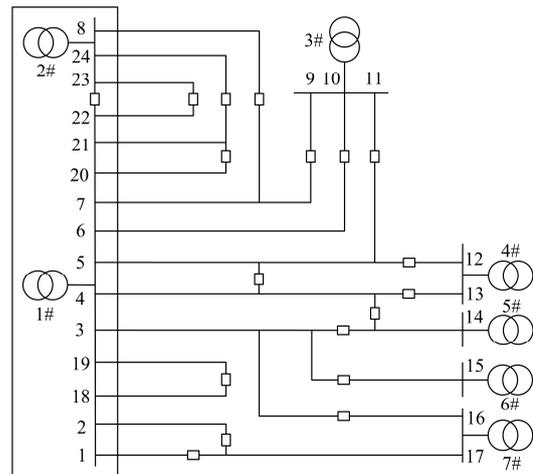


图 2 以校验主变 1#为中心的校验单元

Fig. 2 Verification group centered round the 1# main-transformer

可以看出, 校验单元重点突出了校验馈线的联络情况。除了与校验馈线之间的联络关系, 联络馈线不考虑其他联络情况, 这是由于配电企业实际规划工作通常不考虑联络馈线的负荷转移, 即不考虑二次转供问题。此外, 联络馈线只能转带与其直接联络的校验馈线负荷。

在对主变进行  $N-1$  校验时, 由于站内其他主变可以通过母联开关转供校验馈线, 同时校验馈线之间无法互相转供, 故校验单元上某些联络开关无法起到转供作用, 可视为无效联络开关, 校验时可以提前去掉。无效联络开关具体包括以下两种情况:

- 1) 如果某条校验馈线只与自身变电站联络, 则

该条校验馈线上的联络开关可以去掉, 如图 2 中馈线 F18~F22;

2) 如果校验馈线之间存在联络关系并且校验馈线均与站外馈线联络, 则校验馈线之间的联络开关可以去掉, 如图 2 中馈线 F4 与 F5 之间联络开关。

经过对联络开关的预处理以后, 将会增加单辐射校验馈线的数量, 如图 3 所示。

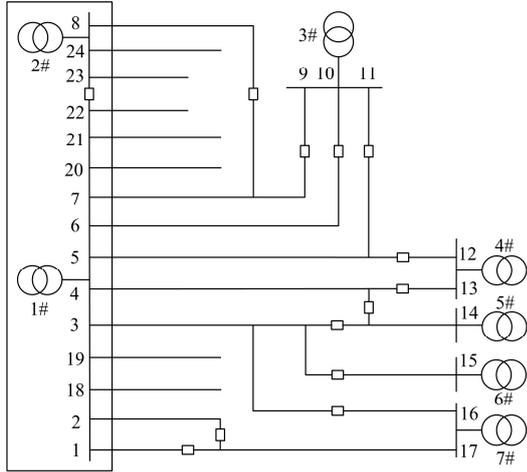


图 3 经预处理后的以校验主变 1#为中心的校验单元

Fig. 3 Verification group centered round the 1# main-transformer after preprocessing

对经过预处理后的校验单元(在接下来章节中简称校验单元)上的单辐射校验馈线, 在进行主变  $N-1$  校验时, 将由站内其他主变通过母联开关转供。

### 3 网络转供校验模型

考虑了站内转供的网络转供校验模型是本文提出的主变  $N-1$  校验方法的核心, 同时该校验模型能够全面地、精确地反映配电网馈线和主变容量约束、实际运行约束和负荷转移通道约束。

设校验单元包含非单辐射校验馈线共  $n$  条, 分别编号为  $1, 2, \dots, n$ ; 包含联络馈线共  $m$  条, 分别编号为  $1, 2, \dots, m$ ; 包含联络主变共  $k$  台, 分别编号为  $1, 2, \dots, k$ 。

定义校验单元联络主变与联络馈线关系矩阵

$$\mathbf{F} = [F_{ij}]_{m \times k} \quad (1)$$

式中, 矩阵元素  $F_{ij}$  表示的是第  $i$  条联络馈线与第  $j$  台联络主变的连接关系 ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, k$ )。当第  $i$  条联络馈线接在第  $j$  台联络主变时取  $F_{ij} = 1$ , 否则  $F_{ij} = 0$ 。

定义校验单元馈线联络关系矩阵

$$\mathbf{L} = [L_{ij}]_{m \times n} \quad (2)$$

式中, 元素  $L_{ij}$  表示第  $i$  条联络馈线与第  $j$  条非单辐射校验馈线的联络关系 ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ )。存在联络关系时取  $L_{ij} = 1$ , 否则  $L_{ij} = 0$ 。

根据校验单元联络主变运行情况, 建立联络主变最大允许电流向量  $\mathbf{X}$  和负载电流向量  $\mathbf{Y}$ , 分别为

$$\mathbf{X} = [X_i]_{k \times 1} \quad (3)$$

$$\mathbf{Y} = [Y_i]_{k \times 1} \quad (4)$$

联络主变最大允许电流列向量  $\mathbf{X}$  中第  $i$  个元素  $X_i$  表示第  $i$  台联络主变的最大允许电流(A); 联络主变负载电流列向量  $\mathbf{Y}$  中第  $i$  个元素  $Y_i$  表示第  $i$  台联络主变的负载电流(A)。主变  $N-1$  校验结果是以主变故障  $N-1$  校验为衡量标准, 故站内其他主变最大允许电流为其额定电流的 120%。

建立非单辐射校验馈线负载电流列向量

$$\mathbf{I} = [I_i]_{n \times 1} \quad (5)$$

式中, 第  $i$  个元素  $I_i$  表示第  $i$  条非单辐射校验馈线的负载电流(A), 一般以馈线首端电流值表示。

根据校验单元联络馈线最大允许电流和负载电流建立联络馈线可转供电流列向量

$$\mathbf{R} = [R_i]_{m \times 1} \quad (6)$$

式中, 第  $i$  个元素  $R_i$  表示第  $i$  条联络馈线的可转供电流(A), 即该联络馈线最大允许电流减去负载电流。

定义如下网络可转供电流矩阵

$$\mathbf{S} = \text{diag}(\mathbf{R}) \cdot \mathbf{L} \quad (7)$$

式中, 运算符 “ $\text{diag}(\bullet)$ ” 表示将列向量转换成以列向量为对角线元素的对角矩阵。网络可转供电流矩阵  $\mathbf{S}$  包含了馈线联络关系信息和联络馈线可转供电流信息, 若其元素  $S_{ij} \neq 0$  则反映了第  $i$  条联络馈线与第  $j$  条非单辐射校验馈线存在联络关系, 并且第  $i$  条联络馈线在不考虑所接主变是否过载以及不转带其他校验馈线负荷的情况下, 最多可转带第  $j$  条非单辐射校验馈线的负荷为  $S_{ij}$ ; 若  $S_{ij} = 0$ , 则第  $j$  条非单辐射校验馈线不与第  $i$  条联络馈线联络。

为了反映主变  $N-1$  校验时非单辐射校验馈线所带负荷的转移以及分配情况, 定义转供矩阵

$$\mathbf{T} = [T_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} T_{11} & \cdots & T_{1j} & \cdots & T_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ T_{i1} & \cdots & T_{ij} & \cdots & T_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ T_{m1} & \cdots & T_{mj} & \cdots & T_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, 矩阵元素  $T_{ij}$  对应馈线联络关系矩阵  $\mathbf{L}$  相应位置的元素  $L_{ij}$ 。若  $L_{ij} \neq 0$ , 则  $0 \leq T_{ij} \leq 1$ , 表示当第  $j$  条

非单辐射校验馈线与第  $i$  条联络馈线存在联络关系时, 第  $i$  条联络馈线转带第  $j$  条校验馈线的负荷, 转带负荷大小为  $T_{ij}S_{ij}$ ; 若  $L_{ij}=0$ , 则  $T_{ij}=0$ , 表示当第  $j$  条非单辐射校验馈线与第  $i$  条联络馈线不存在联络关系时, 第  $i$  条联络馈线不会转带第  $j$  条校验馈线的负荷。因此转供矩阵  $\mathbf{T}$  也可以指导配电企业选择分段开关的装设地点。

结合配电网规划中主变  $N-1$  校验条件, 转供矩阵  $\mathbf{T}$  应满足以下 5 个约束:

1) 从转供矩阵  $\mathbf{T}$  的定义知,  $\mathbf{T}$  是非负矩阵

$$\mathbf{T} \geq \mathbf{0} \quad (9)$$

2) 某些地区配电企业规划部门对馈线负荷转移时转供电操作次数进行了限制, 如转供电操作次数不能超过 2 次, 则应该满足约束: 非单辐射校验馈线的负荷转移时, 每条校验馈线闭合的联络开关数不能超过 2 个, 即

$$2 \cdot \mathbf{a} - \mathbf{b} \cdot [\mathbf{T}] \geq \mathbf{0} \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{b}$  分别为  $n$  维、 $m$  维满“1”行向量; 运算符“ $[\cdot]$ ”表示将矩阵各元素向上取整。

如果转供电操作次数限制为不能超过 3 次, 则式(10)第一项系数改为 3; 如果无转供电操作次数限制, 则不考虑此约束。

1) 联络馈线所转带的负荷电流不能超过其本身的可转供电流, 本文称为主变  $N-1$  校验下联络馈线的容量约束, 即

$$\mathbf{R} - (\mathbf{T} \times \mathbf{S}) \cdot \mathbf{a}^T \geq \mathbf{0} \quad (11)$$

式中, 运算符“ $\times$ ”表示矩阵对应位置元素相乘。结合转供矩阵  $\mathbf{T}$  与馈线联络关系矩阵  $\mathbf{L}$  的关系以及网络可转供电流矩阵  $\mathbf{S}$  的定义, 简化上式, 即

$$\mathbf{b} - \mathbf{a} \cdot \mathbf{T}^T \geq \mathbf{0} \quad (12)$$

2) 非单辐射校验馈线的全部负荷能够被转移出去, 即

$$\mathbf{b} \cdot (\mathbf{T} \times \mathbf{S}) - \mathbf{I}^T \geq \mathbf{0} \quad (13)$$

3) 联络主变转带校验主变负荷后, 其负载不应超过最大允许值, 即

$$\mathbf{X} - \mathbf{Y} - \mathbf{D} - \mathbf{F}^T \cdot ((\mathbf{T} \times \mathbf{S}) \cdot \mathbf{a}^T) \geq \mathbf{0} \quad (14)$$

式中,  $\mathbf{D}$  为  $k$  维列向量, 表示站内其他主变转带单辐射校验馈线负荷。如果第  $i$  台联络主变为站内其他主变, 那么  $D_i$  为单辐射校验馈线负荷电流之和; 否则  $D_i = 0$ 。

值得注意的是, 文献[11]提出的 TSC 模型包含了馈线  $N-1$  约束和主变  $N-1$  约束。其中主变  $N-1$  约束考虑了其他主变在转带  $N-1$  校验主变负荷后不能超过其额定容量的问题, 但该 TSC 模型并未对转

带校验主变负荷后的联络馈线的负载进行约束, 即未考虑主变  $N-1$  校验下联络馈线的容量约束。校验主变的负荷通过网络转移给其他主变时, 联络馈线可能转带多条校验馈线上的负荷, 此时联络馈线的容量约束不同于馈线  $N-1$  约束。因为馈线  $N-1$  约束只限制了单一馈线发生  $N-1$  故障并转移负荷后其联络馈线不能过载, 此时联络馈线只转带一条馈线的负荷。因此文献[11]的 TSC 模型在主变  $N-1$  校验方面考虑不够全面。

如果存在转供矩阵  $\mathbf{T}$  满足以上 5 个约束, 则说明校验主变通过  $N-1$  校验。否则无法转移全部负荷的非单辐射校验馈线需要去掉联络开关, 改为站内转供, 然后再一次寻找满足 5 个约束的转供矩阵  $\mathbf{T}$ , 如果存在转供矩阵  $\mathbf{T}$ , 则说明校验主变通过  $N-1$  校验, 否则不通过  $N-1$  校验。

定义以下函数

$$g(x) = \begin{cases} 0 & x \geq 0 \\ 1 & x < 0 \end{cases} \quad (15)$$

对于矩阵  $\mathbf{Z} = [z_{ij}]_{m \times n}$ , 函数  $g(x)$  运算为

$$g(\mathbf{Z}) = [g(z_{ij})]_{m \times n} \quad (16)$$

为了寻找满足 5 个约束的转供矩阵  $\mathbf{T}$  或者确定无法转移全部负荷的非单辐射校验馈线, 都需要判断  $\mathbf{b} \cdot (\mathbf{T} \times \mathbf{S}) - \mathbf{I}^T$  是否大于  $\mathbf{0}$ 。因此本文将第 4 个约束转换为目标函数, 即联络馈线转带非单辐射校验馈线负荷后, 无法转移全部负荷的非单辐射校验馈线负荷之和最小, 网络转供校验模型如下:

$$\min v = g(\mathbf{b} \cdot (\mathbf{T} \times \mathbf{S}) - \mathbf{I}^T) \cdot \mathbf{I}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{S} = \text{diag}(\mathbf{R}) \cdot \mathbf{L} \\ \mathbf{T} \geq \mathbf{0} \\ 2 \cdot \mathbf{a} - \mathbf{b} \cdot [\mathbf{T}] \geq \mathbf{0} \\ \mathbf{b} - \mathbf{a} \cdot \mathbf{T}^T \geq \mathbf{0} \\ \mathbf{X} - \mathbf{Y} - \mathbf{D} - \mathbf{F}^T \cdot ((\mathbf{T} \times \mathbf{S}) \cdot \mathbf{a}^T) \geq \mathbf{0} \end{cases} \quad (17)$$

由校验模型可知, 若  $v=0$ , 则存在满足 5 个约束的转供矩阵  $\mathbf{T}$ , 校验主变通过  $N-1$  校验; 若  $v \neq 0$ , 则可由  $g(\mathbf{b} \cdot (\mathbf{T} \times \mathbf{S}) - \mathbf{I}^T)$  确定无法转移全部负荷的非单辐射校验馈线, 并改为站内转供, 然后再一次寻找满足 5 个约束的转供矩阵  $\mathbf{T}$ 。

在主变  $N-1$  校验的过程中, 本文采用标准差分进化算法求解网络转供校验模型的最优值。差分进化算法通用性强, 原理简单, 易于实现, 并且具有记忆个体最优解和种群内信息共享的优点<sup>[15]</sup>。因此差分进化算法能够确保主变  $N-1$  校验方法的实用性。由于篇幅限制, 详细的差分进化算法介绍见文献[15], 本文不再赘述。

## 4 算例

### 4.1 算例概述

为了验证本文提出的主变 N-1 校验方法的有效性, 结合某地配电网网架特点, 整理出一个典型的以 N-1 校验主变为中心的校验单元, 如图 2 所示。该校验单元考虑了配电网常见的馈线接线模式, 能够完整地反映实际配电网的网架情况。

校验单元中, 1#主变为 N-1 校验主变, 2#主变为站内其他主变, 3#至 7#主变为联络主变, 所有主变变比都为 110 kV/10 kV, 联络主变数据如表 1 所示; 馈线 1~24 都为 10 kV 中压馈线, 馈线数据分别如表 2、表 3 所示。

表 1 联络主变数据

Table 1 Data of interconnected main-transformers

主变	额定容量/MVA	最大允许电流/A	负载电流/A
2#	63	4 157	2 106
3#	40	2 199	1 104
4#	50	2 749	1 512
5#	40	2 199	1 320
6#	40	2 199	2 119
7#	50	2 749	1 924

表 2 校验馈线负载数据

Table 2 Load data of verification feeders

馈线	负载电流/A	馈线	负载电流/A	馈线	负载电流/A
1	301	5	364	19	327
2	278	6	218	20	378
3	161	7	186	21	454
4	441	18	369	22	323

表 3 联络馈线数据

Table 3 Data of interconnected feeders

馈线	最大允许 电流/A	负载电 流/A	馈线	最大允许 电流/A	负载电 流/A
8	631	419	14	671	411
9	454	321	15	631	439
10	372	145	16	671	525
11	454	198	17	454	82
12	454	245	23	454	264
13	631	317	24	454	275

### 4.2 算例求解

利用本文提出的主变 N-1 校验方法对本算例中的 1#主变进行校验。在本算例中, 用于求解网络转供校验模型最优值的标准差分进化算法的参数分别设置为: 种群规模  $N=100$ ; 缩放比例因子  $K=0.8$ ; 交叉概率  $CR=0.9$ 。

通过利用差分进化算法求解本算例中网络转供校验模型的最优值, 可以得到:

#### 1) 转供矩阵 $T$

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.57 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.53 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.98 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.82 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.97 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.87 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.83 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.41 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.96 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.81 & 0.05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

无法转移全部负荷的非单辐射校验馈线

$$g(\mathbf{b} \cdot (\mathbf{T} \times \mathbf{S}) - \mathbf{I}^T) = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

#### 2) 网络转供校验模型的最优值

$$v = 278$$

因此, 由  $v \neq 0$  可知, 经过预处理后的校验单元存在需要改为站内转供的非单辐射校验馈线, 根据  $g(\mathbf{b} \cdot (\mathbf{T} \times \mathbf{S}) - \mathbf{I}^T)$  的结果可以确定馈线 F2 无法转移全部负荷。

将馈线 F2 改由站内其他主变 2#通过母联开关转供, 再次求解网络转供校验模型的最优值:

#### 1) 转供矩阵 $T$

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.00 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.50 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.99 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.87 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.76 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.94 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.94 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.94 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.24 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.85 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.87 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

#### 2) 无法转移全部负荷的非单辐射校验馈线

$$g(\mathbf{b} \cdot (\mathbf{T} \times \mathbf{S}) - \mathbf{I}^T) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

#### 3) 网络转供校验模型的最优值

$$v = 186$$

可见, 将无法转移全部负荷的非单辐射校验馈线 F2 改为站内转供后, 再次求解校验模型的最优值  $v \neq 0$ , 所以校验主变 1#不通过 N-1 校验, 并且站内其他主变 2#无法转带校验主变 1#的全部负荷。

### 4.3 算例对比

在本算例中, 馈线 F1 发生  $N-1$  校验时其负荷 301A 能够转移给可转供电流为 372A 的馈线 F17, 馈线 F2 发生  $N-1$  校验时同样也能够将 278A 的负荷转移给馈线 F17。由于文献[11]的 TSC 模型未考虑主变  $N-1$  校验下联络馈线的容量约束, 因此根据该模型可以推断 1#主变  $N-1$  校验时, 馈线 F1、F2 的负荷(总共 579 A)能够都转移给馈线 F17, 可能得出 1#主变通过  $N-1$  校验的结论。相比文献[11]的主变  $N-1$  校验方法, 本文提出的校验方法能够考虑主变  $N-1$  校验时联络馈线 F17 由于同时转带两条校验馈线 F1、F2 负荷而超过过载最大允许值的情况, 因此本文提出的校验方法更加精确。

## 5 结论

为保证连续地、可靠地向用户供电, 配电网必须能够承受主变故障而不停电。为此, 配电网主变必须通过  $N-1$  校验。然而现有主变  $N-1$  校验方法不够精确, 校验结果往往不能够令人信服。在结合配电企业实际规划、运行工作的基础上, 本文提出了精确的配电网主变  $N-1$  校验方法。相比现有的其他主变  $N-1$  校验方法, 本文提出的校验方法综合地考虑了馈线与主变之间的容量约束, 同时也考虑了馈线转带多条馈线时的容量约束以及实际运行约束。因此本文提出的校验方法能够更全面地考虑配电网各种实际约束, 更贴近配电网的实际情况, 校验结果更精确。

### 参考文献

- [1] 陈春, 汪泓, 刘蓓, 等. 一种智能配电网安全运行控制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 357-366.  
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. A method of safe operation control of smart distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 357-366.
- [2] 傅志生, 白晓清, 李佩杰, 等. 一种快速求解大规模安全约束最优潮流的多核并行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 29-37.  
FU Zhisheng, BAI Xiaoqing, LI Peijie, et al. A high-speed multi-core parallel method for solving large-scale security constrained OPF[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 29-37.
- [3] 卢志刚, 刘艳娥, 马丽叶, 等. 基于安全等级的电网最优安全经济域研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 210-218.  
LIU Zhigang, LIU Yane, MA Liye, et al. The optimal security and economic region study based on the security hierarchy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 210-218.
- [4] 潘晶. 城市配电网规划自动  $N-1$  校验研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.  
PAN Jing. Study on automatic  $N-1$  verification for urban distribution network planning[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [5] 王博. 大规模配电网快速  $N-X$  校验方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.  
WANG Bo. Study on fast  $N-X$  verification method for large-scale distribution network[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [6] 陈珂宁, 吴文传, 郭昆亚, 等. 基于负荷恢复策略的配电网  $N-1$  安全评估[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3241-3246.  
CHEN Kening, WU Wenchuan, GUO Kunya, et al. Security evaluation under  $N-1$  for distribution network based on load restoration strategies[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3241-3246.
- [7] 肖峻, 刘世嵩, 李振生, 等. 基于潮流计算的配电网最大供电能力模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5516-5524.  
XIAO Jun, LIU Shisong, LI Zhensheng, et al. Model of total supply capability for distribution network based on power flow calculation[J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(31): 5516-5524.
- [8] 肖峻, 李振生, 刘世嵩, 等. 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, et al. Impact of voltage constrains and losses on total supply capability calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 36-43.
- [9] 李滨, 杜孟远, 祝云, 等. 基于准实时数据的智能配电网状态估计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 34-44.  
LI Bin, DU Mengyuan, ZHU Yun, et al. A state estimator for smart distribution networks with quasi-real time data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 34-44.
- [10] LUO F Z, WANG C S, XIAO J, et al. Rapid evaluation method for power supply capability of urban distribution system based on  $N-1$  contingency analysis of main-transformers[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32(10): 1063-1068.

- [11] XIAO J, LI X, GU W Z, et al. Model of distribution system total supply capability considering feeder and substation transformer contingencies[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2015, 65: 419-424.
- [12] 肖峻, 苏步芸, 贡晓旭, 等. 基于馈线互联关系的配电网安全域模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(20): 36-44.  
XIAO Jun, SU Buyun, GONG Xiaoxu, et al. Model of distribution system security region based on interconnections of feeders[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(20): 36-44.
- [13] 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.
- [14] 刘胜利, 陈建华, 曹阳, 等. 基于  $N-1$  和负荷特性的配电网最大接入容量研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(12): 126-130.  
LIU Shengli, CHEN Jianhua, CAO Yang, et al. The largest access capacities analysis of distribution grid based on  $N-1$  and the load characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(12): 126-130.
- [15] 杨烁, 曹思扬, 戴朝华, 等. 电能质量扰动信号时频原子分解的进化匹配追踪算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(16): 79-86.  
YANG Shuo, CAO Siyang, DAI Chaohua, et al. Evolutionary matching pursuit based time-frequency atom decomposition for power quality disturbance signals[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(16): 79-86.

---

收稿日期: 2016-01-04; 修回日期: 2016-03-09

作者简介:

荆朝霞(1975-), 女, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力市场、电力系统规划和运行; E-mail: zxjing@scut.edu.cn

李晓波(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网规划、负荷预测。E-mail: li\_xiaobo3412@163.com

(编辑 葛艳娜)