

DOI: 10.7667/PSPC170572

## 基于 TSC 的馈线接入用户容量计算方法

俞伟<sup>1</sup>, 陈运<sup>2</sup>, 胡晓哲<sup>1</sup>, 甄国栋<sup>3</sup>, 张宝强<sup>4</sup>, 肖峻<sup>4</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司杭州供电公司, 浙江 杭州 310009; 2. 国网浙江杭州市富阳区供电有限公司, 浙江 杭州 310009; 3. 国网天津电力公司检修公司, 天津 300000; 4. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 基于配电网最大供电能力理论(Total Supply Capability, TSC)提出了一种新的馈线接入用户容量计算方法。首先, 介绍了 TSC 理论的基本知识, 给出了其数学模型和求解方法。其次, 根据 TSC 计算结果进一步得到馈线 10 kV 侧的可接入容量以及不合理馈线段的调整方案。然后, 对已知负荷分布及其 0.4 kV 侧变压器容量进行分析, 计算得到 10 kV 侧负荷大小到 0.4 kV 侧配变容量的折算系数, 并基于折算系数得到各馈线用户侧的接入配变容量。最后, 通过算例验证了所提方法的有效性。基于 TSC 理论确定馈线接入用户容量, 能够在保证  $N-1$  安全准则前提下充分利用配电网最大供电能力, 为供电企业科学开展业扩工作提供了理论依据和辅助参考。

**关键词:** 最大供电能力; 馈线裕度; 可接入容量; 用户

### Calculation method of user accessible capacity based on TSC

YU Wei<sup>1</sup>, CHEN Yun<sup>2</sup>, HU Xiaozhe<sup>1</sup>, ZHEN Guodong<sup>3</sup>, ZHANG Baoqiang<sup>4</sup>, XIAO Jun<sup>4</sup>

(1. Hangzhou Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd, Hangzhou, Zhejiang, 310009, China; 2. Fuyang District Power Supply Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310009, China; 3. Maintenance Company, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300000, China; 4. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Based on the theory of Total Supply Capability (TSC), a new method of calculating the User Accessible Capacity (UAC) is given. First, the basic knowledge of TSC theory is introduced, and its mathematical model and solving method is given. Second, the accessible capacity of the feeder 10 kV side of the distribution network can be further obtained on the basis of the results of TSC, as well as the adjustment scheme of the unreasonable feed sections. Third, the known load distribution and its distribution transformer capacity on 0.4 kV lateral is analyzed, and the conversion coefficients of 10 kV side load to 0.4 kV side distribution transformer capacity is got. On the basis of the conversion coefficient, UAC of each feeder is reached conveniently. Finally, a numerical example is taken to prove this method. Determining UAC on the basis of theory of TSC can make full use of the maximum power supply capacity of the distribution network under the premise of ensuring the  $N-1$  security standards, which provides a theoretical basis and auxiliary reference for the power supply enterprise to carry out the business expansion.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277129).

**Key words:** total supply capability (TSC); feeder margin; accessible capacity; user

## 0 引言

我国经济发展迅速, 用电量也在逐年上升, 配电网经常需要接入新负荷来满足负荷变化的需要, 在配电网电源点不足且要满足  $N-1$  安全的前提下, 根据配电网的最大供电能力(Total Supply Capability,

TSC)<sup>[1]</sup>挖掘配电网的供电潜力是非常重要的。

配电网由变电站供出的馈线一般分成若干段, 在馈线末端与其他馈线实现手拉手的联络。挖掘配电网的供电潜力就是分析配电网变电站间隔、馈线、馈线段各个环节的最大供电能力, 进而与现有负荷大小比较得到可接入容量。所以, 可接入容量是在考虑设备额定容量的情况下, 满足  $N-1$  准则时各馈线和主变还可以接入的容量。在实际配电网的业扩工作中, 随时都会接入新的负荷, 需要事先判断是

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51277129); 国网浙江杭州供电公司科技项目资助(5211HZ150190)

否具有足够的剩余容量以支撑新负荷的接入。但实际情况是目前并没有对配电网各级可用容量的有效测算手段, 规划技术原则中只有关于配电变压器装接容量上限的推荐值, 因此实践中都是依靠人为的经验判断, 可能导致有的馈线接入负荷过多, 给电网运行造成一定的安全隐患; 有的馈线则接入负荷过少, 宝贵的电网资源得不到充分利用。

科学地进行配电网可接入容量测算是业扩工作的迫切需要, 对下一步制定电网规划、电网改造计划也是第一手的宝贵资料。本文应用TSC理论研究了这一实际问题, 并提出了一种新的馈线接入用户容量计算方法。

### 1 最大供电能力的基本知识

TSC正逐渐成为评价配电网的一个重要指标, 其含义是指当配电网所有馈线N-1校验和变电站主变N-1校验均满足时, 该配电网所能带的最大总负荷。N-1校验时, 需要考虑主变间和馈线间的负荷转带、网络中主变以及馈线间的联络关系、主变和馈线的容量、主变过载系数等配电网的实际运行约束。在现有计算TSC的各种方法中, 主要有解析法<sup>[1]</sup>和模型法<sup>[2]</sup>两种计算方法。文献[3-4]通过分析馈线间联络关系得到主变间的联络通道, 提出了计及主变压器N-1准则的基于主变互联的供电能力解析计算方法; 文献[5]进一步计及了线路容量和变压器过载系数的影响, 提高了供电能力计算结果的准确性; 文献[6-7]充分考虑主变互联, 建立了严格的计算TSC的数学模型, 将该问题定性为线性规划问题, 并能够求得最优解; 文献[8]充分考虑主变互联和馈线互联, 建立了严格地计算TSC的线性规划数学模型, 并能够求得最优解, 也成为了当前最接近配电网实际情况的TSC求解方法。

除配电网总体TSC外, TSC模型和计算还能给出达到TSC时各主变、馈线或馈线段上的负荷分布情况, 通过进一步设定负荷均衡目标函数, 还可以得到TSC下最均衡的负荷分布<sup>[8]</sup>。

## 2 基于 TSC 的接入用户容量计算方法

### 2.1 总体策略

为了得到馈线接入用户容量(User Accessible Capacity, UAC)的计算结果, 需要:

- 1) 根据文献[8]基于馈线互联关系的TSC模型和求解方法, 得到各主变、馈线或馈线段的负荷分布大小;
- 2) 根据TSC时各馈线或馈线段的负荷分布大小, 以及给定工作点下各馈线或馈线段的实际负荷

分布大小, 得到各馈线或馈线段的可接入容量。

3) 根据可接入容量以及10 kV侧各馈线或馈线段上的负荷与0.4 kV侧配电变压器容量折算系数, 得到配电网已知工作点下, 各馈线或馈线段的接入用户配电变压器容量。

总体流程如图1所示。

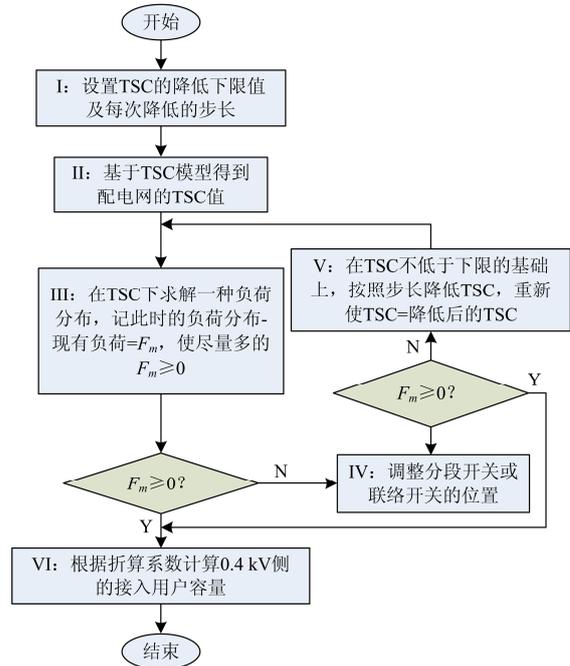


图 1 计算接入用户容量的总体策略

Fig. 1 Overall strategy for calculating UAC

### 2.2 模型和算法

#### 2.2.1 TSC 的模型与求解

配电网的 TSC 定义为所有馈线 N-1 校验和主变 N-1 校验均满足时, 配电网所能带的最大负荷。以馈线 N-1 和主变 N-1 校验作为约束条件, 将配电网所带负荷总和最大作为目标函数, 便得到基于馈线互联的 TSC 模型。文献[8]给出了一种 TSC 模型, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} \max \text{TSC} = \sum_i F_i \\ \text{s.t.} & F_m = \sum_n t_{rfmn} \\ & t_{rtij} = \sum_{F_m \in T_i, F_n \in T_j} t_{rfmn} \\ & t_{rfmn} + F_n \leq R_{F_n} \quad \forall m, n \\ & t_{rtij} + \sum_{F_m \in T_j} F_m \leq R_j \quad \forall i, j \\ & L_D \leq \sum_{i \in Z} \sum_{F_m \in T_i} F_m \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $F_m$  为馈线  $m$  的负荷大小;  $t_{rfmn}$  为馈线  $m$  发

生  $N-1$  故障时转带给馈线  $n$  的负荷量;  $t_{rij}$  为主变  $i$  发生  $N-1$  故障时转带给主变  $j$  的负荷量;  $F_m \in T_i$  表示馈线  $m$  出自主变  $i$  的对应母线;  $L_D$  为某个重载区负荷的下限;  $Z$  为重载区所有主变集合。

上述模型未列出电压约束, 要体现电压约束, 需建立交流潮流模型, 文献[9]做了相关工作, 但交流模型求解需要迭代, 计算复杂度大大增加。文献[8]指出, 城市配电线路长度往往较短, 电压降较小, 还可通过无功补偿等调压措施进一步调节, 且故障后运行方式的运行电压偏移量可以适当放宽, 故模型未列出电压约束。文献[9]结果也表明, 在分段开关数量足够且配置合理的条件下, 文献[8]计算结果与交流模型误差不大。由于本文用于规划, 对精度要求不是非常高, 因此本文沿用了文献[8]的模型。

### 2.2.2 可接入容量计算方法

步骤 1: 基于 TSC 模型得到各个馈线或馈线段的负荷分布(对应图 1 中的 II 和 III)。

设馈线或馈线段  $m$  上的现有负荷为  $F'_m$ , 在 TSC 时, 求解一种负荷分布  $F_m^{\text{TSC}}$ , 使得馈线或馈线段  $m$  上可接入的负荷  $\Delta F_m = F_m^{\text{TSC}} - F'_m$  非负值个数最多。当所有  $\Delta F_m$  都为非负时, 此时便可得到各个馈线或馈线段上的可接入容量。结束。当存在  $\Delta F_m$  为负时, 此时应继续步骤 2。

步骤 2: 调整分段开关或联络开关的位置(对应图 1 中的 IV)。

调整馈线段分段开关和联络开关的位置, 使得  $m$  上的现有负荷从  $F'_m$  变为  $F''_m$ , 使得调整分段开关和联络开关后  $m$  上可接入的负荷  $\Delta F_m = F_m^{\text{TSC}} - F''_m$  都为非负值, 否则继续步骤 3 的操作。

此处对调整开关位置的具体方法做解释, 并引入馈线段偶(Dual Feeder Sections, DFS)的概念。“馈线段偶”的概念引申自“馈线偶”<sup>[10]</sup>, 馈线偶指联络开关相连接的两回馈线。本文将联络开关或分段开关两侧的两个馈线段定义为馈线段偶, 即从一个分段开关或者联络开关两侧出发, 沿着相反方向, 总可以搜索到其余分段开关、联络开关或馈线开关, 则前述开关与后述这两个开关之间的两个馈线段称为一个馈线段偶。以图 2(a)电缆单环网为例, 联络开关为环网柜 2 内的 B, 馈线开关为 A、C, 则两段馈线段 BA 和 BC 即为一对馈线段偶, 馈线段偶中 BA 段的负荷包括  $F_0$ 、 $F_1$ 、 $F_2$ , BC 段的负荷包括  $F_3$ 、 $F_4$ 、 $F_5$ 。

以图 2 为例, 假设 BA 馈线段的可接入容量为正, BC 馈线段的可接入容量为负, 由可接入的负

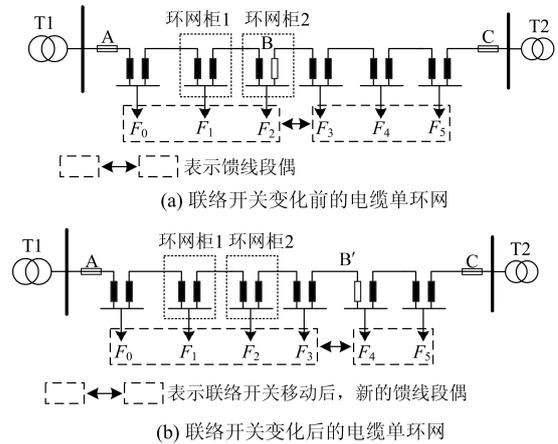


图 2 电缆单环网的馈线段偶

Fig. 2 DFS in cable single-ring network

荷计算方法  $\Delta F_m = F_m^{\text{TSC}} - F'_m$ , 说明 BA 馈线段内实际负荷  $F'_m$  小于 TSC 时的负荷  $F_m^{\text{TSC}}$ 、BC 馈线段内实际负荷  $F'_m$  大于 TSC 时的负荷  $F_m^{\text{TSC}}$ 。在配电网中, 可以通过调节联络开关来改变馈线段偶内的实际负荷  $F'_m$  分布, 显然, 此时若将 BC 的实际负荷  $F'_m$  转移一部分到 BA, 此时 BC 的  $F'_m$  减少, BA 的  $F'_m$  增加, 有可能既充分利用 BA 的可接入容量, 又使得 BC 的可接入容量从负值变为正值, 所以联络开关 B 应该向 C 移动, 操作过程对比图 2(a)、图 2(b), 此时联络开关由 B 变到 B'。此时馈线段偶中 B'A 段的负荷包括  $F_0$ 、 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ , B'C 段的负荷包括  $F_4$ 、 $F_5$ 。上述联络开关移动的方向和大小是可以精确计算的。

1) 方向: 在一个馈线段偶内, 联络开关或分段开关由可接入容量为正的馈线段移向可接入容量为负的馈线段。

2) 大小: 联络开关或分段开关的变化意味着馈线段偶两侧的负荷变化, 开关变化引起的负荷变化量应满足

$$\min(\Delta F_m^+, |\Delta F_m^-|) \leq \delta F \leq \max(\Delta F_m^+, |\Delta F_m^-|) \quad (2)$$

式中:  $\delta F$  表示移动开关引起的馈线段偶内的负荷变化量;  $\Delta F_m^+$  表示馈线段偶内可接入容量为正的一侧的可接入容量;  $\Delta F_m^-$  表示馈线段偶内可接入容量为负的一侧的可接入容量。

馈线段偶的实质是给出了负荷调整的最小单元, 可接入容量能够直接指导馈线段偶内的负荷调整, 也即指导联络开关或分段开关位置的移动, 其移动的依据为式(2), 这样通过开关的移动, 能够使配电网拥有最大的可接入容量, 并且各馈线或馈线段的可接入容量都为非负值。

需要指出的是: 1) 某个负荷所在的馈线段偶可

能不止一个,本文对馈线段偶的选取办法是优先选择包含联络开关的馈线段偶;2)有些馈线段偶是否可以实际操作,要考虑实际配电网的现实情况,实际工程可能不能满足调整开关位置的需要,其主要原因有两,一是通过分段开关或者联络开关节节负荷是离散的,可能始终不满足上述负荷变化量不等式,二是配电网自动化程度未完全覆盖,调节分段开关或者联络开关费时费力等。

步骤3:降低TSC,并重复步骤1的操作(对应图1中的V)。

当按照步骤2不能满足要求时,此时按照一定步长逐步降低配电网的TSC值,记为 $TSC_{cut}$ ,并认为配电网供电能力为 $TSC_{cut}$ ,重复步骤1,直到 $TSC_{cut}$ 低于TSC设定的下限。

通过步骤1—步骤3的循环处理,最终得到各个馈线或馈线段上的可接入容量 $\Delta F_m$ ,或输出不能得到合理结果。

根据上述计算方法,可以尽量高的TSC确定任意给定配电网的任意馈线或馈线段的可接入容量,并且主变容量配置越合理<sup>[11]</sup>、变电站间联络线越充足<sup>[12]</sup>的配电网,其计算可接入容量的TSC水平越高,反之越低。当电网计算可接入容量的TSC水平低于可接受的TSC下限时,则说明主变容量配置不合理或变电站间联络线缺乏,此时可通过文献[13]提出的配电网分层供电能力分析方法来限制TSC的因素进行分析,从而对主变容量或变电站间联络做出调整,包括增加主变容量、增加联络线数量或网络重构等措施。

### 2.2.3 接入用户容量计算方法

上述步骤给出了配电网10kV侧,各个馈线或馈线段上的可接入容量计算方法,对于下一级电网来讲,需要根据可接入容量和折算系数 $\eta$ 计算配电变压器的容量,即接入用户容量UAC。

$$UAC = \frac{\Delta F_m}{\eta} \quad (3)$$

式中,折算系数 $\eta$ 与各馈线段上总负荷曲线、负荷的不同类型比例、馈线上配变总容量有关。

总负荷曲线的获取是计算UAC的关键,总负荷曲线的获取方法主要有负荷加权叠加法<sup>[14-16]</sup>和FCM聚类算法<sup>[17-19]</sup>。负荷加权叠加法的总负荷曲线是根据不同负荷的负荷特征曲线以及不同负荷的占比而获取,将不同负荷的负荷特征曲线分别与负荷的占比相乘,并将各负荷相乘的结果相加便得到了负荷加权叠加法的总负荷曲线;FCM聚类算法的总负荷曲线根据众多的电力日负荷数据而获得,需依次将电力负荷数据进行归一化处理、确定聚类中心

$c$ 和加权值 $m$ 、通过FCM聚类算法得到聚类曲线。上述两种算法分别主要用于实施需求侧管理和负荷预测的计算中,计算过程中都需要大量的原始数据。由于本文计算可接入容量和接入用户容量UAC都更侧重于一个时间断面上的计算,因此上述两种负荷曲线计算方法并不是很适用于本文计算接入用户容量。

为了得到免于提取大量原始数据,可计算任意时间断面,简便实用的接入用户容量计算方法,本文提出了一种新的计算折算系数 $\eta$ 的实用方法。该计算折算系数 $\eta$ 的方法是根据负荷类型、负荷类型比例以及馈线上的配电变压器总容量来确定。其中,负荷类型主要分为民用负荷、商业负荷和工业负荷,分类划分可大致按照政府用地类型来区分;各个负荷类型的比例可根据不同政府用地类型上的总负荷的比例来获取;配电变压器总容量可根据已知线路上的配电变压器台数、容量计算得到,即总容量=台数 $\times$ 容量。例如,对于一条线路,若某一时间断面上的民用负荷、商业负荷和工业负荷大小分别为 $x_1$  MVA、 $x_2$  MVA、 $x_3$  MVA,配电变压器总容量分别为 $y_1$  MVA、 $y_2$  MVA、 $y_3$  MVA,则该线路上不同负荷类的折算系数可分别按照公式(4)计算。

$$\eta_{民用} = \left( \frac{x_1}{y_1} \times \frac{x_1}{x_1+x_2+x_3} + \frac{x_2}{y_2} \times \frac{x_2}{x_1+x_2+x_3} + \frac{x_3}{y_3} \times \frac{x_3}{x_1+x_2+x_3} \right) \times \frac{3x_1}{x_1+x_2+x_3} \times \beta = \frac{3\beta x_1}{(x_1+x_2+x_3)^2} \times \left( \frac{x_1^2}{y_1} + \frac{x_2^2}{y_2} + \frac{x_3^2}{y_3} \right) \quad (4)$$

式中: $\frac{x_1}{y_1}$ 表示民用负荷的折算系数, $\frac{x_1}{y_1} \times \frac{x_1}{x_1+x_2+x_3} + \dots + \frac{x_3}{y_3} \times \frac{x_3}{x_1+x_2+x_3}$ 表示将民用负荷、商业负荷和工业负荷按照不同负荷比例加权得到的折算系数; $\frac{3x_1}{x_1+x_2+x_3}$ 表示全线路负荷可接入大小都

折算为民用负荷的配电变压器参数,与 $\frac{x_1}{x_1+x_2+x_3}$ 含义类似; $\beta$ 表示根据经验所得的配变最佳负载率。

同理可得,对于商业负荷和工业负荷的折算系数 $\eta$ 的计算方法为

$$\eta_{商业} = \frac{3\beta x_2}{(x_1+x_2+x_3)^2} \times \left( \frac{x_1^2}{y_1} + \frac{x_2^2}{y_2} + \frac{x_3^2}{y_3} \right) \quad (5)$$

$$\eta_{工业} = \frac{3\beta x_3}{(x_1+x_2+x_3)^2} \times \left( \frac{x_1^2}{y_1} + \frac{x_2^2}{y_2} + \frac{x_3^2}{y_3} \right) \quad (6)$$

### 3 算例验证

#### 3.1 算例简介

算例的配电网示意图如图 3 所示。

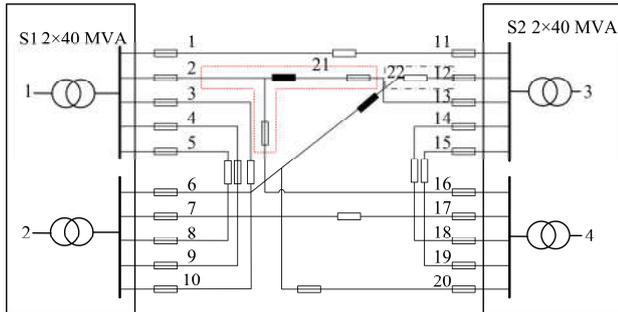


图 3 算例配电网示意图

Fig. 3 Schematic of numerical distribution network

图 3 中共有 2 个变电站, 4 台主变, 20 条馈线出线, 22 个馈线或馈线段负荷, 分别表示为  $F_1 \sim F_{22}$ , 需指出, 该处的负荷指的是馈线或馈线段上的集中负荷, 而实际馈线或馈线段上有很多的负荷和开关, 将图 3 中虚线红框中的馈线段放大后的实际接线图见图 4。

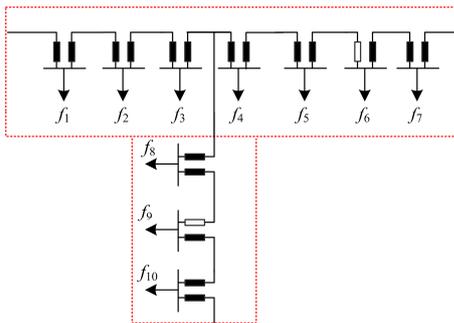


图 4 局部放大接线图

Fig. 4 Local amplification of distribution network

将每个馈线或馈线段上的可接入容量分别记为  $\Delta F_1 \sim \Delta F_{22}$ , 馈线均选用 JKLYJ-185, 容量全部为 11.30 MVA。变电站主变数据见表 1。

表 1 主变数据

Table 1 Data of main transformers

变电站	主变压器	变比/(kV/kV)	容量/MVA
S1	1	35/10	40
	2	35/10	40
S2	3	35/10	40
	4	35/10	40

表 2 给出了算例配电网的一个工作点, 分别给出了  $F_1 \sim F_{22}$  当前的负荷值。

工作点 P 的负荷分布记为  $F'_m$ , 在当前负荷水平下, 配电网总的负荷大小为 49.75 MVA。

表 2 工作点 P

Table 2 Operating point P

负荷编号	负荷值/MVA	负荷编号	负荷值/MVA
$F_1$	2.04	$F_{12}$	4.33
$F_2$	0.32	$F_{13}$	4.77
$F_3$	4.98	$F_{14}$	2.81
$F_4$	2.10	$F_{15}$	0.42
$F_5$	0.65	$F_{16}$	3.21
$F_6$	0.19	$F_{17}$	2.32
$F_7$	2.32	$F_{18}$	2.68
$F_8$	3.84	$F_{19}$	1.07
$F_9$	2.13	$F_{20}$	4.38
$F_{10}$	0.50	$F_{21}$	0.71
$F_{11}$	2.45	$F_{22}$	1.53

#### 3.2 TSC 计算结果

根据 2.2.1 的 TSC 模型, 计算上述电网的 TSC 值为 114.33 MVA。在 TSC=114.33 MVA 下, 将馈线或馈线段上可接入的负荷  $\Delta F_m = F_m^{TSC} - F'_m$  非负值个数最多作为目标函数, 求得一种负荷分布  $F_m^{TSC}$ , 见表 3 第 3 列。

以表 3 中前 4 列的第 1 行  $F_1$  为例, 通过 TSC 模型求解馈线或馈线段的负荷分布为  $F_1^{TSC} = 5.83$  MVA, 实际负荷为  $F'_1 = 2.04$  MVA, 则  $F_1$  的可接入容量计算方法为  $\Delta F_1^{TSC} = F_1^{TSC} - F'_1 = 5.83 - 2.04 = 3.79$  MVA。同理可得  $F_2 \sim F_{22}$  的所有可接入容量  $\Delta F_m^{TSC}$  (第 4 列)。根据最后一行前 4 列可得, 当前工作点的总负荷值为 49.75 MVA, 可接入容量总量理论值等于  $114.33(\text{TSC 值}) - 49.75 = 64.58$  MVA。

由于第 4 列中  $\Delta F_m^{TSC}$  存在 5 个负值, 接下来应按照 2.2.2 节步骤 2 处理。发现对于该实际配电网, 通过调整分段开关或者联络开关位置, 并不能完全去除负的可接入容量数量, 例如: 以  $F_{22}$  为例, 其所在馈线段偶  $F_{12} \sim F_{22}$ , 位于图 3 中的点画线框部分, 其配电网实际接线图见图 5。

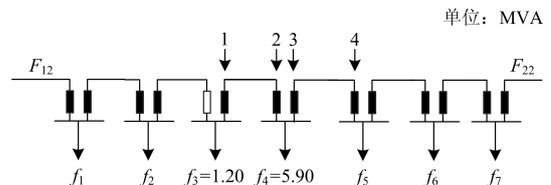


图 5 配网线路实际接线图

Fig. 5 Actual wiring diagram of distribution network

如表 3 所示,  $F_{12}$  和  $F_{22}$  两者可接入容量分别为 7.00 MVA 和 -1.36 MVA, 一正一负, 联络开关向  $F_{22}$

一侧移动时的负荷变化量  $\delta F$  应满足  $1.36 \text{ MVA} \leq \delta F \leq 7.00 \text{ MVA}$ 。由图 5 实际接线图可知, 当联络开关向  $F_{22}$  移动时, 馈线段偶  $F_{12} \sim F_{22}$  离散的负荷变化量最小值为  $\delta F = f_3 = 1.20 \text{ MVA}$ , 小于  $1.36 \text{ MVA}$ , 此时联络开关由初始位置变化到 1 或 2; 次小值为  $\delta F = f_3 + f_4 = 7.10 \text{ MVA}$ , 大于  $7.00 \text{ MVA}$ , 此时联络开关由初始位置变化到 3 或 4; 之后  $\delta F$  会变得更大, 大于  $7.00 \text{ MVA}$ 。由于  $\delta F$  始终不满足  $1.36 \text{ MVA} \leq \delta F \leq 7.00 \text{ MVA}$ , 说明无论按照何种方式调节联络开关位置, 配电网总出现主变或者馈线过载, 即此时不再满足全网  $N-1$  安全。所以, 对于该实际配电网, 即便通过步骤 2 处理后, 也存在负的可接入容量。

进一步按照 2.2.2 节步骤 3 的方法处理上述情况。将 TSC 降低为原值的 0.9 倍, 即  $TSC_{\text{cut}} = 0.9 \times TSC$ , 即  $TSC_{\text{cut}} = 102.90 \text{ MVA}$ 。此时, 配电网在此供电能力下, 得到  $TSC_{\text{cut}}$  下的负荷分布  $F_m^{\text{TSC}_{\text{cut}}}$  和可接入容量  $\Delta F_m^{\text{TSC}_{\text{cut}}}$  见表 3 的第 5 列和第 6 列。

表 3 TSC、 $TSC_{\text{cut}}$  下负荷分布及可接入容量  
Table 3 Load distribution and accessible capacity  
in TSC and  $TSC_{\text{cut}}$

负荷 编号	$F'_m /$ MVA	$F_m^{\text{TSC}} /$ MVA	$\Delta F_m^{\text{TSC}} /$ MVA	$F_m^{\text{TSC}_{\text{cut}}} /$ MVA	$\Delta F_m^{\text{TSC}_{\text{cut}}} /$ MVA
$F_1$	2.04	5.83	3.79	4.71	2.67
$F_2$	0.32	0.17	-0.15	0.23	-0.09
$F_3$	4.98	5.67	0.69	7.63	2.65
$F_4$	2.10	5.67	3.57	4.73	2.63
$F_5$	0.65	5.67	5.02	3.3	2.65
$F_6$	0.19	0.00	-0.19	4.81	4.62
$F_7$	2.32	5.83	3.51	4.97	2.65
$F_8$	3.84	5.67	1.83	6.49	2.65
$F_9$	2.13	5.67	3.54	4.77	2.64
$F_{10}$	0.50	5.67	5.17	3.14	2.64
$F_{11}$	2.45	5.67	3.22	5.12	2.67
$F_{12}$	4.33	11.33	7.00	6.52	2.19
$F_{13}$	4.77	11.63	6.86	6.66	1.89
$F_{14}$	2.81	2.62	-0.19	5.48	2.67
$F_{15}$	0.42	2.92	2.50	3.08	2.66
$F_{16}$	3.21	11.33	8.12	7.88	4.67
$F_{17}$	2.32	5.67	3.35	5.00	2.68
$F_{18}$	2.68	2.92	0.24	5.35	2.67
$F_{19}$	1.07	2.92	1.85	3.75	2.68
$F_{20}$	4.38	11.33	6.95	3.52	-0.86
$F_{21}$	0.71	0.00	-0.71	2.60	1.89
$F_{22}$	1.53	0.17	-1.36	3.16	1.63
总计	49.75	114.33	64.58	102.90	53.15

从表 3 看出, 经过上述少量降低 TSC 的方法调整, 各回馈线的可接入容量非负值的分布得到明显改善,  $\Delta F_m^{\text{TSC}_{\text{cut}}}$  只存在 2 个负值, 比降低 TSC 之前减少了 3 个负值。对于 2 处可接入容量为负的情况, 进一步采用馈线段偶优化。

$F_2$  和  $F_{20}$  的可接入容量为负, 分别选取  $F_2$  和  $F_{20}$  所在的馈线段偶  $F_2 \sim F_{16}$  和  $F_6 \sim F_{20}$ , 根据式(3), 由于  $F_2$  和  $F_{20}$  的可接入容量为负, 联络开关应分别向  $F_2$  和  $F_{20}$  移动, 移动的负荷变化量应分别是  $0.09 \text{ MVA} \leq \delta F_1 \leq 4.67 \text{ MVA}$ ,  $0.86 \text{ MVA} \leq \delta F_2 \leq 4.62 \text{ MVA}$ , 馈线段偶  $F_2 \sim F_{16}$  和  $F_6 \sim F_{20}$  的详细接线图见图 6。

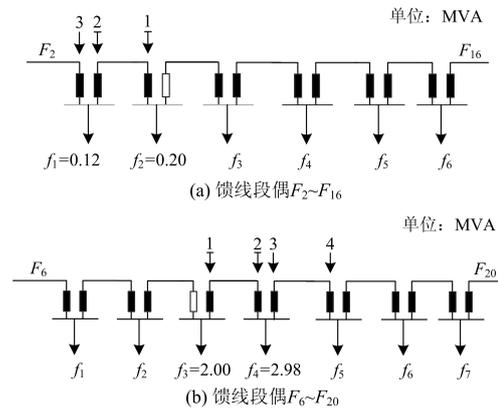


图 6 两馈线段偶的详细接线图

Fig. 6 Detailed wiring diagram of two DFS

由详细的接线图可知, 对于馈线段偶  $F_2 \sim F_{16}$ , 当联络开关向  $F_2$  移动时, 馈线段偶  $F_2 \sim F_{16}$  离散的负荷变化量最小值为  $\delta F_1 = f_2 = 0.20 \text{ MVA}$ , 满足  $0.09 \text{ MVA} \leq \delta F_1 \leq 4.67 \text{ MVA}$ , 次小值  $\delta F_1 = f_2 + f_1 = 0.32 \text{ MVA}$ , 也满足  $0.09 \text{ MVA} \leq \delta F_1 \leq 4.67 \text{ MVA}$ , 考虑到负荷分布的均衡性, 此时选择  $\delta F_1 = 0.20 \text{ MVA}$  的负荷变化作为负荷调整量, 所以联络开关移动到图 6(a) 的 1 或 2 的位置; 对于馈线段偶  $F_6 \sim F_{20}$ , 当联络开关向联络开关向  $F_{20}$  移动时, 馈线段偶  $F_6 \sim F_{20}$  离散的负荷变化量最小值为  $\delta F_2 = f_3 = 2.00 \text{ MVA}$ , 满足  $0.86 \text{ MVA} \leq \delta F_2 \leq 4.62 \text{ MVA}$ , 次小值  $\delta F_2 = f_3 + f_4 = 4.98 \text{ MVA}$ , 不满足  $0.86 \text{ MVA} \leq \delta F_2 \leq 4.62 \text{ MVA}$ , 所以联络开关移动到图 6(b) 的 1 或 2 的位置。此时, 得到完整的联络开关的调节方案, 见表 4。

通过上述分析过程可得: 算例配电网的最大供电能力为  $114.33 \text{ MVA}$ , 当前总负荷大小为  $49.75 \text{ MVA}$ , 配电网有  $64.58 \text{ MVA}$  的可接入总容量, 由于配电网的初始负荷分布不合理, 为了充分利用配电网的最大供电能力, 并得到可指导实际工程(即全部为非负值)的可接入容量, 需要:

表 4 TSC<sub>cut</sub> 下负荷调整情况及可接入容量

馈线段偶	负荷编号	原/新工作点负荷值/MVA	负荷变化方式/MVA	可接入容量/MVA	联络开关变化方式
$F_2 \sim$	$F_2$	0.32/0.12	减少 0.2	1.91	从 $F_2$ 向
$F_{16}$	$F_{16}$	3.21/3.42	增加 0.2	2.67	$F_{16}$ 移动
$F_6 \sim$	$F_6$	0.19/2.19	减少 2	1.62	从 $F_6$ 向
$F_{20}$	$F_{20}$	4.38/2.38	增加 2	2.14	$F_{20}$ 移动

1) 将 TSC 降低到原值的 0.9 倍, 并规划求解得到可接入容量非负值最多的负荷分布;

2) 根据可接入容量的正负分布, 根据表 4 指导调整联络开关, 改善工作点的负荷分布均衡, 使各馈线可接入容量全部为非负值, 总计 53.15 MVA, 最终结果见表 5。

表 5 TSC<sub>cut</sub> 下全非负的可接入容量

馈线编号	可接入容量/MVA	馈线编号	可接入容量/MVA
$F_1$	2.67	$F_{12}$	2.19
$F_2$	1.91	$F_{13}$	1.89
$F_3$	2.65	$F_{14}$	2.67
$F_4$	2.63	$F_{15}$	2.66
$F_5$	2.65	$F_{16}$	2.67
$F_6$	1.62	$F_{17}$	2.68
$F_7$	2.65	$F_{18}$	2.67
$F_8$	2.65	$F_{19}$	2.68
$F_9$	2.64	$F_{20}$	2.14
$F_{10}$	2.64	$F_{21}$	1.89
$F_{11}$	2.67	$F_{22}$	1.63

### 3.3 接入用户容量计算结果

根据表 5 各个馈线或馈线段的可接入容量, 结合各个馈线或馈线段上供电区域内政府规定用地类型、各用地的配变总容量、各用地的总负荷, 配变最佳负载率  $\beta$  取 95%<sup>[20]</sup>, 根据式(4)一式(6)即可得到不同负荷类型的接入用户容量。

以图 3 馈线  $F_1$  为例, 根据表 5 得其可接入容量为 2.67 MVA。经过调取图 3 电网在 PMS2.0 的数据可得, 其负荷分为民用负荷、商业负荷和工业负荷, 负荷大小分别为 0.81 MVA、0.72 MVA、0.51 MVA, 总负荷大小为 2.04 MVA, 三种负荷类型的接入配变总容量分别为 1.10 MVA、1.10 MVA、1.05 MVA。根据式(4)可得, 线路  $F_1$  上民用负荷的负荷折算系数为

$$\eta_{\text{民用}} = \frac{3\beta x_1}{(x_1 + x_2 + x_3)^2} \times \left( \frac{x_1^2}{y_1} + \frac{x_2^2}{y_2} + \frac{x_3^2}{y_3} \right) = \frac{2.85 \times 0.81}{2.04^2} \times \left( \frac{0.81^2}{1.10} + \frac{0.72^2}{1.10} + \frac{0.51^2}{1.05} \right) = 0.72 \quad (7)$$

根据式(5)、式(6)得商业负荷和工业负荷的负荷折算系数分别为  $\eta_{\text{商业}} = 0.65$ 、 $\eta_{\text{工业}} = 0.46$ 。根据式(3), 图 3 馈线  $F_1$  上民用负荷、商业负荷和工业负荷的接入用户容量 UAC 的计算结果分别为: 3.69 MVA、4.08 MVA、5.77 MVA。按照该方法, 也可计算得到其余各个馈线或馈线段的民用负荷、商业负荷和工业负荷的接入用户容量。

## 4 结论

本文首次研究了配电网馈线可接入容量的理论计算问题, 解决了长期以来实践中依赖经验估算、缺乏理论依据的问题。本文主要贡献如下:

1) 提出了基于最大供电能力 TSC 理论的馈线可接入容量, 能够在计及  $N-1$  安全约束的前提下得到馈线的可接入配电变压器容量;

2) 提出馈线段偶的概念, 将其作为配电网调整的最小分析单元, 用于分析分段开关、合理地选取联络开关, 并作出调整, 从而确保配电网各元件有一定的  $N-1$  安全裕量, 保证配电网的  $N-1$  安全性。

本文方法以 TSC 理论为基础, 科学确定馈线接入用户容量, 能够最大限度地发挥配电网的供电能力, 提升资产利用率, 有助于帮助电网运行人员决策, 为供电企业科学开展工作提供了理论依据和辅助参考。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 刘洪, 郭寅昌, 葛少云, 等. 配电系统供电能力的修正计算方法[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 1-7.  
LIU Hong, GUO Yinchang, GE Shaoyun, et al. A modified method to evaluate power supply capability of distribution system[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 1-7.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] XIAO Jun, LI Fangxing, GU Wenzhuo, et al. Total supply capability (TSC) and associated indices for distribution planning: definition, model, calculation and applications[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(8): 869-876.
- [8] 肖峻, 谷文卓, 贡晓旭, 等. 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, GONG Xiaoxu, et al. A total supply capability model for power distribution network based on feeders interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 72-77.
- [9] 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]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5516-5524.
- [10] 刘健, 毕鹏翔, 董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [11] 肖峻, 贺琪博, 白林泉, 等. 实现最大供电能力的配电网馈线与主变压器容量匹配[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 53-58.  
XIAO Jun, HE Qibo, BAI Linqun, et al. Optimal capacity ratio between feeders and main transformers to implement total supply capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 53-58.
- [12] 刘思源, 林凌雪, 肖鸣晖. 变电站站间联络率研究[J]. 吉林电力, 2016, 44(5): 20-23.  
LIU Siyuan, LIN Lingxue, XIAO Minghui. Research on tie-lines ratio between substations[J]. Jilin Electric Power, 2016, 44(5): 20-23.
- [13] 刘健, 殷强, 张志华. 配电网分层供电能力评估与分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 44-48.  
LIU Jian, YIN Qiang, ZHANG Zhihua. Evaluation and analysis of hierarchical total supply capability for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 44-48.
- [14] 李啸骢, 李春涛, 从兰美, 等. 基于动态权值相似日选取算法的短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 1-8.  
LI Xiaocong, LI Chuntao, CONG Lanmei, et al. Short-term load forecasting based on dynamic weight similar day selection algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 1-8.
- [15] 傅军栋, 杨姚, 罗善江. 智能小区居民用电负荷特征权重分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 41-45.  
FU Jundong, YANG Yao, LUO Shanjiang. Residential electricity load features weighting analysis in smart community[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 41-45.
- [16] 康重庆, 夏清, 张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 1-11.  
KANG Chongqing, XIA Qing, ZHANG Bomeng. Review of power system load forecasting and its development[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 1-11.
- [17] 张姣玲. 利用FCM求解最佳聚类数的算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(22): 65-67.  
ZHANG Jiaoling. FCM-based algorithms for determining optimal number of cluster[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(22): 65-67.
- [18] 周开乐, 杨善林. 基于改进模糊C均值算法的电力负荷特性分类[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 58-63.  
ZHOU Kaile, YANG Shanlin. An improved fuzzy C-means algorithm for power load characteristic classification[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 58-63.
- [19] 张少敏, 赵硕, 王保义. 基于云计算和量子粒子群算法的电力负荷曲线聚类算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 93-98.  
ZHANG Shaomin, ZHAO Shuo, WANG Baoyi. Research of power load curve clustering algorithm based on cloud computing and quantum particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 93-98.
- [20] 周晓虹, 陈叔涛. 配电变压器的节能[J]. 华东电力, 2010, 38(9): 1475-1477.  
ZHOU Xiaohong, CHEN Shutao. Energy saving of distribution transformer[J]. East China Electric Power, 2010, 38(9): 1475-1477.

收稿日期: 2017-04-20; 修回日期: 2017-08-03

作者简介:

俞伟(1986—),男,工程师,研究方向为配电网运行、检修、规划。E-mail: 61898397@qq.com

(编辑 姜新丽)