

基于有向图的配网供电能力实用计算方法

张雅迪¹, 方朝雄², 张林垚², 郭瑞鹏¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350003)

摘要: 计及 $N-1$ 准则的配网供电能力在计算时需考虑站内供电能力和站间负荷转移能力。基于配电网“闭环设计、开环运行”的特点, 采用有向图模型描述站间联络关系并进行分析计算。首先, 引入理想一供一备结构的概念及其有向图形式, 提出联络馈线可根据转供方式拆分为理想一供一备结构的集合。然后, 依据实际配网运行要求给出不同接线模式下联络馈线的分解方法, 从而实现负荷转移时馈线容量约束的解耦, 将复杂配电网简化为清晰直观的有向拓扑结构图。最后, 基于有向图描述的配电网建立了供电能力计算模型, 通过算例证明了方法的实用性和有效性。

关键词: 供电能力; 配电网; 负荷转移能力; 接线模式; 有向图

A practical solution for supply capability of a distribution network based on an oriented graph

ZHANG Yadi¹, FANG Chaoxiong², ZHANG Linyao², GUO Ruipeng¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. State Grid Fujian Provincial Economic Research Institute, Fuzhou 350003, China)

Abstract: The calculation of supply capability for a power distribution network which takes the $N-1$ criterion into account needs to consider both the power supply capability of the substations and the transfer capability between substations. Given the characteristics of “closed-loop design and open-loop operation” of the distribution network, a directed graph is used to describe the connection relationship between substations and calculate total supply capability. First, the concept of ideal ‘one supply, one backup’ structure and its directed graph form are introduced. It is pointed out that the connected feeders can be split into one supply one backup structures according to the transfer mode. Then, based on the actual distribution network operation requirements, the connected feeders are decomposed according to different connection modes, thereby decoupling the feeder capability constraints during load transfer. This simplifies the complex distribution network into a clear and intuitive directed topology diagram. Finally, the calculation model of total supply capability is established based on the distribution network described by the directed graph. The practicality and effectiveness of the method are illustrated by an example.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902800).

Key words: supply capability; distribution power system; transfer capability of network; connection modes; oriented graph

0 引言

作为连接发、输电系统和用户的纽带, 配电网对供电可靠性的影响不容忽视。供电能力是配电网评估时的一个重要参考指标, 合理计算供电能力可以反映电网的负荷供应水平以及薄弱环节, 为配网规划和运行提供参考和依据, 具有重要的意义^[1-3]。

众多学者对配电网的供电能力计算方法做了大量研究: 容载比法^[4-5]从宏观角度对配电网的供电能力做出评价, 但其考虑因素不够全面, 仅仅反映变电容量对于负荷的适应情况, 当线路结构与变电容量匹配程度较差时, 评估结果误差较大^[6]; 尝试法^[7-8]不断增加现有负荷并反复进行潮流计算, 直至出现越限情况时得到正常运行下的最大供电能力, 该方法计算复杂且受现有负荷分布和负荷增长方式的影响很大; 随着 $N-1$ 安全准则^[9-11]的提出, 考虑负

荷转移的供电能力逐渐成为评价配电网的一个重要指标^[12-13]。文献[14]提出一种基于主变互联的供电能力计算方法, 文献[15]在此基础上进一步考虑了联络容量的限制和二次转供的情况, 使计算结果更加准确。文献[16]建立了计及馈线互联的供电能力模型, 通过将变电站负荷细分到馈线来得到更接近实际情况的结果, 该模型被广泛使用^[17-19], 然而当实际工程中存在多种馈线结构时, 计算模型维度增加, 问题描述变得复杂, 此外在求取最优解时可能出现部分馈线负载率不满足运行规则、实际配网难以实现负荷最优分布的问题^[20]。

基于上述研究, 本文提出一种计及 $N-1$ 安全准则的配网供电能力实用计算方法。该方法依据实际配网运行要求将变电站低压侧联络馈线按照接线模式进行分解, 采用有向图描述变电站间互为备用的关系, 将复杂配电网简化为清晰直观的有向拓扑结构图, 最后采用优化模型求解区域供电能力。

1 配网结构化简方法

1.1 理想一供一备结构

n 供一备结构由 n 座供电变电站、1 座备用变电站和站间联络线构成。正常情况下供电变电站的出线带负荷, 备用变电站的出线空载运行, 当供电变电站发生主变 $N-1$ 故障时, 其出线负荷可通过联络开关转移到备用侧。理想一供一备结构是 n 为 1 的特殊形式, 用于描述站间馈线的负荷转移关系。

基于配网闭环设计、开环运行的特点, 将联络馈线进行分解。如图 1(a), 两变电站间存在手拉手联络结构, 正常情况下联络开关 $KB1$ 断开, 馈线 $F1$ 、 $F2$ 上的负荷分别由各自所属变电站供电, 任一方发生主变 $N-1$ 故障时, $KB1$ 闭合, 馈线负荷转移至对侧, 应满足的馈线容量约束为

$$\begin{aligned} P_{F1} + P_{F2} &\leq R_F \\ R_F &= \min\{R_{F1}, R_{F2}\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: P_{F^*} 为馈线 F^* 分配的负荷功率; R_{F^*} 为馈线 F^* 的额定容量。

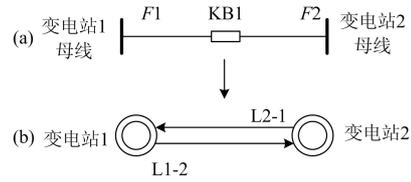


图 1 结构化简示意图

Fig. 1 Diagram of structure simplification

对于馈线 $F1$ 而言, 变电站 1 相当于供电变电站, 变电站 2 相当于备用变电站, 为一个理想一供一备结构。基于图论相关概念^[21], 将此结构描述为有向图形式: 馈线 $F1$ 看作一条有向边 L_{1-2} , 由变电站 1 指向变电站 2, 方向反映发生主变 $N-1$ 故障时该部分负荷的转移情况, 容量反映馈线 $F1$ 的带负荷上限, 此处取实际运行中手拉手馈线的负荷上限 $50\%R_F$ 。同理对馈线 $F2$ 进行分析, 得到图 1(b)所示有向图。

1.2 联络结构分解

站间联络馈线有多种接线模式^[22-24], 下文给出具体分解方法。

1.2.1 n 供一备结构

如图 2 所示, 对 n 供一备典型结构进行分解。该单元内每座供电变电站都通过自身主供线路和备用线路构成与备用变电站之间的联络通道。备用线路所带负荷为零, 等效为有向边后相当于容量为零, 可省略。任一供电变电站 i 发生主变 $N-1$ 故障时, 主供线路 F_i 所带负荷可以通过联络开关向备用变电站转移, 因而可以等效为 n 个理想一供一备结构,

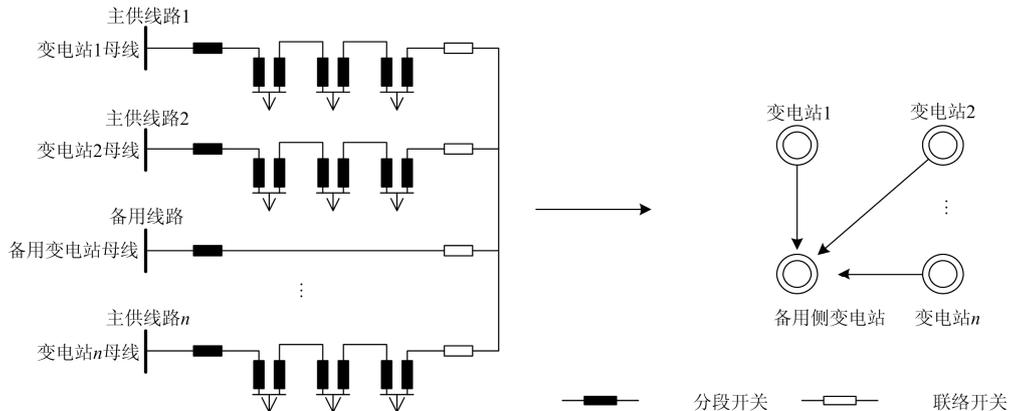


图 2 n 供一备结构化简

Fig. 2 Simplification of n -supply-one-backup structure

相应每条有向边的容量 $R_{L_{i-j}}$ 为

$$R_{L_{i-j}} = \min \{R_{F_i}, R_{F_j}\} \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

式中, R_{F_i} 、 R_{F_j} 分别为联络开关两侧线路 F_i 和线路 F_j 的额定容量。

1.2.2 架空两联络结构

如图 3 所示架空两联络结构, 当变电站 1 发生主变 $N-1$ 故障时, 其低压侧馈线 $F1$ 经分段开关分为 $F11$ 和 $F12$ 两段, 两段馈线所带负荷可以经过联络开关分别转移到变电站 2 和变电站 3, 因而可以等效为以变电站 1 为供电侧, 变电站 2、3 分别为备用侧的两个理想一供一备结构。线路实际运行时最大允许负载率为 66.7%, 假设线路负荷分布均匀, 每条有向边的容量为

$$R_{L_{i-j}} = (1-66.7\%) \times \min \{R_{F_i}, R_{F_j}\} \quad (3)$$

式中, R_{F_i} 、 R_{F_j} 分别为联络开关两侧线路 F_i 和线路 F_j 的额定容量。

1.2.3 其他结构

配网运行中, 为满足线路 $N-1$ 安全准则, 不同接线模式的馈线都有相应的最大允许负载率。所有典型结构单元均可按照上述思路分解为若干个理想一供一备结构的集合。馈线 F_i 经过与馈线 F_j 联络构成有向边 L_{i-j} , 其容量可按式(3)计算。

$$R_{L_{i-j}} = (1-\eta) \times \min \{R_{F_i}, R_{F_j}\} \quad (4)$$

式中, η 为网架结构系数, 反映不同接线模式的供电能力, 部分网架结构系数取值见表 1。

需要指出, 实际配电网中也存在非典型接线模式的联络结构, 若直接采用式(4)计算, 可能在 $N-1$ 校验时出现部分馈线负荷越限的情况, 应对其进行修改。考虑到线路负载率均衡性要求, 可以将联络馈线间负荷转移的线路容量约束进行如下简化:

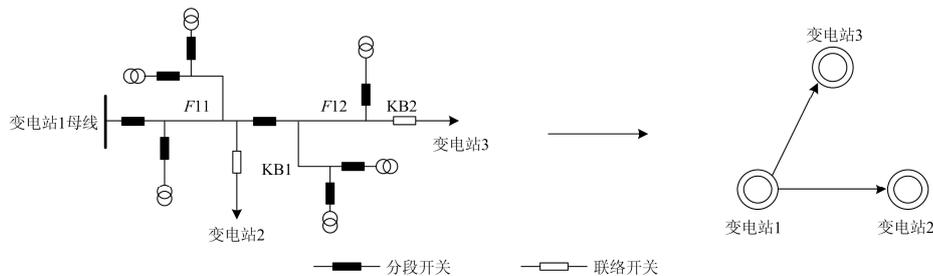


图 3 两联络结构简化

Fig. 3 Simplification of multi-connection structure

1.3 化简方法

考虑到配电网规模庞大, 本文所提有向图模型仍无法直接应用, 还需要进一步处理。引入馈线联

表 1 网架结构系数

Table 1 Coefficient of grid structure

典型结构	η
架空单联络/电缆单环网	50%
架空两联络	66.7%
架空三联络	75%
电缆双环网	50%

$$\begin{cases} \frac{P_{F_i}}{K_i} + P_{F_j} \leq R_{F_j} \\ \frac{P_{F_j}}{K_j} + P_{F_i} \leq R_{F_i} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{F_i} \leq \frac{K_i}{K_i+1} R_{F_j} \\ P_{F_i} \leq \frac{K_j}{K_j+1} R_{F_i} \end{cases} \quad (5)$$

式中, K_* 为馈线 F^* 的联络开关数目。

进一步得到有向边容量求解方法:

$$R_{L_{i-j}} = \min \left\{ \frac{K_i}{K_i+1} R_{F_j}, \frac{K_j}{K_j+1} R_{F_i} \right\} \times \frac{1}{K_i} \quad (6)$$

为便于对配网中的馈线结构统一分析, 将式(4)修改为

$$R_{L_{i-j}} = \min \{ \eta_j \times R_{F_i}, \eta_i \times R_{F_j} \} \times \frac{1}{K_i} \quad (7)$$

式中: η_* 为相应馈线的网架结构系数, 可根据联络开关数目求得, $K_*/(1+K_*)$ 。对于典型结构而言 $\eta_i = \eta_j$, 此时式(7)与式(4)一致。

所有结构单元分解完毕后, 对供电侧变电站及备用侧变电站均相同的理想一供一备联络线进行合并(即对起点和终点相同的有向边进行合并), 容量线性相加, 得到配网的简化有向拓扑图。值得注意的是, 对于研究的问题而言, 两节点间即使存在双向边, 反映的却是不同变电站低压侧的联络馈线信息, 不能将其进行合并。

络矩阵 L 来表征馈线间的联络关系, L_{ij} 表示馈线 i 与馈线 j 之间的联络关系, 当存在联络时为 1, 否则为 0(对角元素均为 0)。本文认为变电站内部负荷

可以通过母联开关自由转移, 因此同一变电站馈线间的联络可以视为无效联络, 为 0。前文中 n 供一备结构在计算等效有向边时具有特殊性, 其对应的联络暂记为 0, 在其余馈线结构计算完毕后对结果进行修正。馈线联络矩阵每行元素之和反映对应馈线的联络开关情况, 因而变电站间有向边容量可按式(8)进行计算。

$$\begin{cases} R_{L_{i-j}} = \min \left\{ \frac{R_{Fj} \times \sum_{p \in G} L_{ip}}{1 + \sum_{p \in G} L_{ip}}, \frac{R_{Fi} \times \sum_{q \in G} L_{jq}}{1 + \sum_{q \in G} L_{jq}} \right\} \times \frac{L_{ij}}{\sum_{p \in G} L_{ip}} \\ R_{S_{a-b}} = \sum_{i \in S_a, j \in S_b} R_{L_{i-j}} + \Delta R'_L \end{cases} \quad (8)$$

式中: G 为所有联络馈线的集合; $R_{S_{a-b}}$ 为变电站 S_a 指向变电站 S_b 的等效有向边容量; $\Delta R'_L$ 为 n 供一备结构对应的修正容量。

2 供电能力优化模型

2.1 相关概念及说明

2.1.1 站内供电能力

站内供电能力指发生主变 $N-1$ 故障时, 仅考虑站内转供的变电站最大带负荷能力, 应满足两个约束条件: 1) 站内容量最大的主变发生故障时仍能保证现有负荷的正常供电^[25]; 2) 正常运行时所带负荷不超过变电站总容量。

$$S_{ca.in} = \min \left\{ k_a \left[\sum_{t=1}^{M_a} R_{a,t} - \max_{1 \leq t \leq M_a} R_{a,t} \right], \sum_{t=1}^{M_a} R_{a,t} \right\} \quad (9)$$

式中: $S_{ca.in}$ 为变电站 a 的站内供电能力; $R_{a,t}$ 为 a 变电站内第 t 台主变容量; M_a 为变电站 a 内主变台数; k_a 为主变短时允许过载倍数, 随着允许运行时间的增大而减小, 可根据实际需求选取, 当计算长期供电能力时取值为 1。

2.1.2 变电站综合供电能力

站内供电能力考虑了主变 $N-1$ 条件下的备用容量, 当站间存在联络时, 备用容量可以部分共用, 有联络的出线所带负荷在 $N-1$ 故障时向外转移, 因而正常运行时变电站带负荷能力可以得到提升。变电站综合供电能力由站内供电能力和低压侧有联络出线分配的功率之和两部分构成, 具体可按式(10)计算。

$$S_{ca} = S_{ca.in} + \sum_{b \in C_a} P_{L_{a-b}} \quad (10)$$

式中: S_{ca} 为变电站 a 的综合供电能力; C_a 为变电站 a 的出线集合。

区域内所有变电站的综合供电能力之和为整

体供电能力。对于单个变电站而言, 综合供电能力并不代表其自身最大供电能力, 而是区域整体供电能力达到最优时, 该变电站应该分配的负荷情况, 此指标可为变电站规划运行提供参考。

2.1.3 计算条件的说明

变电站低压侧出线存在多种形式: 1) 直接由变电站母线引出的单辐射接线, 与其他变电站之间不存在任何联络; 2) 通过联络开关与其他变电站相连的出线; 3) 同一变电站内有联络的出线。当发生主变 $N-1$ 故障时, 单辐射接线所带负荷仅可在变电站内部进行转移; 与其他变电站有联络的出线所带负荷通过联络开关转移给对方变电站; 同一变电站的出线间联络并未起到对整体供电能力的提升作用, 可视作无效联络。

本文以变电站为研究对象, 主要分析站间联络对整体供电能力的提升作用。当变电站所有出线均为无联络或无效联络时, 最多可带的负荷为 2.1.1 节所求站内供电能力。在此基础上若要进一步提升变电站的供电能力, 则需增加有站间联络的馈线。当发生主变 $N-1$ 故障时, 负荷的转带原则为: 无联络馈线上的负荷由站内其他主变转带, 有联络馈线上的负荷转移至相邻变电站。

配电网为高效经济运行、减少停电带来的损失, 多对馈线进行合理分段, 基于均衡性考虑, 本文认为同一线路上各段馈线可装接配变容量上限相等。

2.2 优化模型

简化后的有向拓扑图清晰描述了变电站间互为备用的信息, 可使用优化模型求解配电网的供电能力。区域内有 Q 座变电站时, 整体供电能力 $S_{ca,area}$ 的目标函数为

$$\max S_{ca,area} = \sum_{a=1}^Q \left(S_{ca.in} + \sum_{b \in C_a} P_{L_{a-b}} \right) \quad (11)$$

站内供电能力为确定值, 由各变电站主变配置情况决定。目标函数实际是求解联络馈线(有向边)所带负荷的最优分配方案。每条有向边分配的功率需要考虑自身及两侧变电站容量约束, 以有向边 L_{a-b} 为例, 其分配的负荷 $P_{L_{a-b}}$ 应满足以下约束。

1) 有向边容量约束

$$0 \leq P_{L_{a-b}} \leq R_{L_{a-b}} \quad (12)$$

表示主变 $N-1$ 故障时变电站 a 通过站间联络转移至变电站 b 的负荷不超过有向边的容量。

2) 变电站供电负荷约束

$$S_{ca.in} + \sum_{b \in C_a} P_{L_{a-b}} \leq R_{S_a} \quad (13)$$

表示正常运行时, 供电变电站按照综合供电能力带负荷主变不过载。

3) 变电站接受负荷转移约束

$$S_{cb.in} + \sum_{l \in C_b} P_{L_{b-l}} + P_{L_{a-b}} \leq k_b R_{S_b} \quad (14)$$

表示备用侧变电站 b 在接受故障变电站 a 转移的负荷之后仍能保证不超过短时允许容量, 短时允许过载倍数的选取原则与 2.1.1 节一致。

至此, 区域内综合供电能力计算的问题转化为线性规划问题, 可以采用线性规划单纯形法或内点法求解, 也可以采用商业优化软件(如 LINGO、CPLEX 等)进行求解。

3 算例分析

如图 4 所示, 研究区域内有 8 座 110 kV 变电站, 站间存在 32 回 10 kV 联络馈线(仅列出了存在站间联络的馈线), 计算该区域内配电网供电能力。为便于分析, 馈线取相同型号, 容量均为 11.3 MVA, 变电站基本信息如表 2 所示, 短时允许过载倍数均取为 1.1。

表 2 变电站基本数据表

Table 2 Basic data list of the case

变电站	容量/MVA	变电站	容量/MVA
S1	2×31.5	S5	2×40
S2	2×31.5	S6	2×40
S3	2×31.5	S7	2×40
S4	2×40	S8	2×40

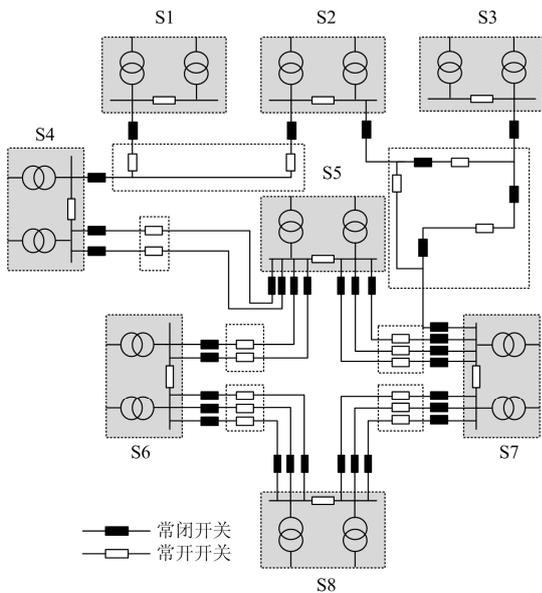


图 4 算例电网

Fig. 4 Example network for the case

3.1 配电网结构化简

由前文所述方法可以得到配电网简化拓扑结构图, 具体化简原理为: 变电站 S2、S3、S7 两两联络, 6 个馈线段可以等效为 6 个一供一备结构, 根据第 1 节, 每条有向边容量为 3.77 MVA。变电站 S1、S2、S4 及之间的联络线路为两供一备结构, 可以分解为 2 个理想一供一备结构, 有向边的容量均为 11.3 MVA。其余站间联络均为单联络结构, 以变电站 S4 与 S5 为例, 每个单联络结构可以拆分为 2 个理想一供一备结构: 一个以变电站 S4 为供电侧, S5 为备用侧, 另一个则相反。有向边容量相同, 均为 50% R_F , 即 5.65 MVA。所有联络馈线拆分、合并完毕后得到图 5 所示的有向图(单位为 MVA)。

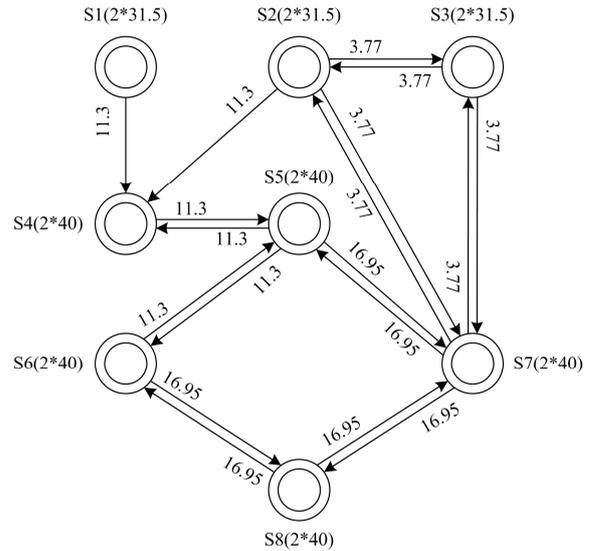


图 5 简化拓扑结构图

Fig. 5 Simplified topology diagram

至此复杂的配电网馈线结构完成了简化, 有向图清晰直观地展示了站间联络对变电站供电能力的支撑情况, 可以在一定程度上反映当前制约供电能力提升的瓶颈, 便于下一步进行计算和分析。

3.2 最大供电能力计算

根据 2.2 节所提优化模型对拓扑结构图进行计算, 求得各联络出线分配功率如图 6 所示, 变电站旁标注为站内最大供电能力/综合供电能力(单位为 MVA)。由计算结果知, 不考虑站间联络时, 研究区域内整体供电能力为各变电站站内供电能力之和, 为 323.95 MVA。为了满足主变 $N-1$ 安全准则, 各个变电站供电时留有较大的备用容量。站间联络通过负荷转移实现了变电站备用容量的共享, 从而提升了整体供电能力。按图 6 对各变电站的联络出线进行负荷分配后, 区域整体供电能力为 493.63 MVA, 供电能力提升了 169.68 MVA, 与基于馈线

互联的供电能力模型求得的供电能力 501.15 MVA 基本一致, 证明了所提方法的有效性。

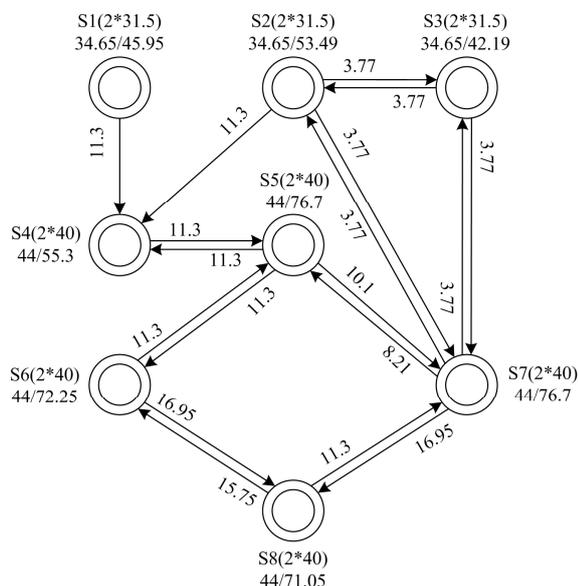


图 6 计算结果示意图

Fig. 6 Schematic diagram of numerical results

本文方法求得的供电能力略低于对比方法的结果, 主要是因为考虑了最大允许负载率的运行要求。最大允许负载率为工程中评价馈线运行状态的重要指标, 基于馈线互联的供电能力模型为达到所求最大供电能力, 在采用均衡模型后仍无法改善变电站 S2、S3、S7 间联络馈线段部分过载、其余空载的负荷分配方案, 而本文方法在馈线分解步骤中已经考虑了不同接线模式下馈线负载率约束, 所求供电能力在当前工程计算中具有一定实用性。

4 结语

计及站间馈线联络结构的配网供电能力模型可有效提升计算准确性, 本文基于负荷转移特点将复杂的实际配电网简化为以变电站为结点、联络馈线为有向边的拓扑结构图, 直观体现了站间联络对于各个变电站供电能力的支撑情况, 便于对 $N-1$ 约束条件下的区域供电能力进行计算分析、为配网升级改造提供参考。所求结果能够基本反映当前变电容量及馈线联络基础上的供电能力, 相应的负荷分配方案满足馈线在不同接线模式下的运行要求, 具有一定实用意义。

参考文献

[1] 田春笋, 殷奕恒, 关朝杰, 等. 基于供电分区的中高压配电网综合评价策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 152-159.

TIAN Chunzheng, YIN Yiheng, GUAN Chaojie, et al. Comprehensive evaluation strategy of medium and high voltage distribution network based on power supply division[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 152-159.

- [2] KAREN N M, CHIANG H D. Electric distribution system load capability: problems formulation, solution algorithm, and numerical results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 436-442.
- [3] 袁博, 邵华, 贺春光, 等. 智能配电系统规划关键问题与研究展望[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 65-73.
- YUAN Bo, SHAO Hua, HE Chunguang, et al. Key issues and research prospects of smart distribution system planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 65-73.
- [4] LIU S, CUI Y, ZHANG Z. Research on rational capacity-load ratio of urban electric network[C] // 2010 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), September 13-16, 2010, Nanjing, China: 1-5.
- [5] 李欣然, 刘友强, 朱湘友, 等. 地区中压配电网容载比的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2006, 34(7): 52-55.
- LI Xinran, LIU Youqiang, ZHU Xiangyou, et al. Research on capacity-load ratio in district MV distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2006, 34(7): 52-55.
- [6] 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): 44-49, 77.
- 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): 44-49, 77.
- [7] 李振坤, 陈星莺, 刘皓明, 等. 配电网供电能力的实时评估分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 36-39, 62.
- LI Zhenkun, CHEN Xingying, LIU Haoming, et al. Online assessment of distribution network loading capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 36-39, 62.
- [8] 周玮, 孙恺, 孙辉, 等. 基于机会约束规划的主动配电网最大供电能力双层优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 70-77.
- ZHOU Wei, SUN Kai, SUN Hui, et al. Bi-level optimization model for load supplying capability in active distribution network based on chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 70-77.
- [9] ZU G, XIAO J, Sun K. Distribution network reconfiguration comprehensively considering $N-1$ security and network loss[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 12(8): 1721-1728.
- [10] CHEN K, WU W, ZHANG B, et al. A method to evaluate

- total supply capability of distribution systems considering network reconfiguration and daily load curves[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(3): 2096-2104.
- [11] HUANG J, GE S, HAN J, et al. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 63-70. DOI: 10.1186/s41601-016-0020-2.
- [12] 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 capacity for distribution network based on power flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5516-5524.
- [13] XIAO J, LI F, GU W, 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): 1063-1068.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] XIAO J, LI X, GU W, et al. Model of distribution system total supply capability considering feeder and substation transformer contingencies[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 65: 419-424.
- [18] 俞伟, 陈运, 胡晓哲, 等. 基于 TSC 的馈线接入用户容量计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 80-87.
YU Wei, CHEN Yun, HU Xiaozhe, et al. Calculation method of user accessible capacity based on TSC[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 80-87.
- [19] 肖峻, 祖国强, 贺琪博, 等. 馈线联络对配电网最大供电能力的作用机理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 38-44, 52.
XIAO Jun, ZU Guoqiang, HE Qibo, et al. Influence mechanism of feeder links on total supply capacity for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 38-44, 52.
- [20] 郭焱林, 刘俊勇, 魏震波, 等. 配电网供电能力研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 33-43.
GUO Yanlin, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Load supply capacity of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 33-43.
- [21] 殷剑宏. 图论及其算法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- [22] 刘洪, 杨卫红, 王成山, 等. 配电网设备利用率评价标准与提升措施[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 419-423.
LIU Hong, YANG Weihong, WANG Chengshan, et al. Assessment criteria and improvement measures of equipment utilization on distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 419-423.
- [23] 李响, 白首华, 付金光, 等. 中压配网接线模式的 GA-Pareto 优选模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 63-68.
LI Xiang, BAI Shouhua, FU Jinguang, et al. GA-Pareto optimization model of mid-voltage distribution network connection mode[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 63-68.
- [24] GE S, CAO L, LIU H. Study on the best utilization rate of equipment in medium-voltage distribution network[C] // 2012 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), May 21-24, 2012, Tianjin, China: 1-4.
- [25] 罗凤章. 现代配电系统评价理论及其综合应用[D]. 天津: 天津大学, 2010.
LUO Fengzhang. Evaluation theories on modern distribution systems and its comprehensive application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-10-25

作者简介:

张雅迪(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划与优化运行; E-mail: ee_zyd@zju.edu.cn

方朝雄(1968—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划设计及技术经济; E-mail: fjepfcx@139.com

张林焱(1980—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划设计。E-mail: 13859086609@qq.com

(编辑 葛艳娜)