

考虑多次转供的配电网最大供电能力评估方法

朱嘉麒¹, 董树锋¹, 徐成司¹, 朱炳铨², 倪秋龙², 徐奇锋²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027;

2. 国网浙江省电力公司, 浙江省 杭州市 310007)

Evaluation Model of Total Supply Capability of Distribution Network Considering Multiple Transfers

ZHU Jiaqi¹, DONG Shufeng¹, XU Chengsi¹, ZHU Bingquan², NI Qiulong², XU Qifeng²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Total supply capacity is an important reference index for distribution network development planning. Existing evaluation methods do not consider multiple transfers, leading the evaluation results conservative, not adapting to the development trend of distribution automation. In view of this, this paper proposes an evaluation model of the total supply capacity of distribution network considering multiple transfers. Firstly, a load path set is established based on path description mode. Then a total supply capacity evaluation model of distribution network is established, taking path on-off state as variable, the maximum system load sum as objective function and the $N-1$ security check condition of the distribution network as constraint. Finally, a penalty function of $N-1$ check is designed, and particle swarm optimization algorithm is used to solve the problem. Case study shows that this method can fully excavate the power supply potential of distribution network. Corresponding power-loss transfer strategy for all kinds of main transformer faults can be put forward and the limitation of traditional evaluation methods can be broken.

KEY WORDS: total supply capability; multiple transfers; path description; $N-1$ security check; particle swarm optimization

摘要: 最大供电能力是配电网发展规划的重要参考数据, 现有评估方法未考虑多次转供, 评估结果偏于保守, 不能适应配电网自动化发展趋势。鉴于此, 提出一种考虑多次转供的配电网最大供电能力评估模型。首先基于路径描述方式, 建立负荷的供电路径集。然后以路径的通断状态为变量, 以系统负荷之和最大为目标函数, 以配电网 $N-1$ 安全校验准则为约束条件, 建立了配电网最大供电能力评估模型。最后采用粒子群算法求解该问题, 并设计了粒子 $N-1$ 校验不通过时的罚函数。算例证明, 该方法可以充分挖掘配电网的供电

潜力, 同时可以针对各类主变故障提出相应的失电负荷转供策略, 破解了传统评估方法的局限性。

关键词: 最大供电能力; 多次转供; 路径描述; $N-1$ 安全校验; 粒子群算法

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2183

0 引言

随着城市建设的快速发展, 城市用地资源愈发紧张, 且投资成本较高, 新的变电站、电力线廊道建设困难。城市既有配电网建设存在多少盈余容量, 以及能够支撑何种负荷分布的安全供电, 决定了未来城市新增负荷的规划并导向配电网的经济拓建方案。因此, 对现有配电网的最大供电能力进行评估是城市电网规划工作的关键一环, 而评估结果的充分性与有效性将直接影响电网建设的社会效益和经济效益^[1-5]。

目前已有大量的文献对配电网最大供电能力的评估提出了相关算法。文献[6]采用了容载比方法对配电网供电能力进行评估, 该方法运算简单, 只能从整体上给出供电能力的粗略值, 且没有考虑配电网的联络转供。文献[7]采用变步长重复潮流算法, 分别对整个配电网、单个区域、单个负荷点进行供电能力评估, 并提出了计算过程中的步长变化策略。文献[8]基于直流潮流模型, 考虑变压器、线路、节点容量约束, 采用线性规划模型求解。根据《城市电力网规划设计导则》^[9]中配电网规划设计的技术原则, 城市的供电安全应采用 $N-1$ 安全准则, 而上述方法均未考虑 $N-1$ 安全校验, 评估结果并不能作为实际配电网规划的参考。文献[10]提出一种基于主变互联关系和 $N-1$ 准则的供电能力计算方法, 但 $N-1$ 情形下, 主变负载率采用均分方式

基金项目: 国网浙江省电力公司科技项目(5211JH16000A)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Company (5211JH16000A).

求取,较为粗糙,且未考虑馈线联络关系。文献[11]考虑了主变联络之间的容量约束,并在建模的同时事先指定了负荷的转供方式,即只有存在联络的站内主变或站外主变才能转带负荷。文献[12]进一步对模型进行细化,考虑了详细的馈线模型并计及馈线 $N-1$ 故障,但负荷的转供局限在相邻的馈线之间。文献[13]考虑了 $N-1$ 故障下主变短时过载的二次转供问题,依然仅局限于一次或二次转供情形,且限定了转供操作次序,未能考虑挖掘更深层次的配电网供电潜力。上述文献均对配电网最大供电能力评估的建模做了基础性工作,后续大量拓展性研究在上述模型的基础上展开,包括配电系统安全域分析^[14-17]、配电网发展规划设计^[18-20]、分布式电源下的最大供电能力评估^[21]。但是,如文献[22]所述,现有基于馈线互联和主变互联的模型中,基本只考虑了一次转供,均未深入考虑多次转供问题,无法充分挖掘既有配电网的供电潜力。随着配电网自动化水平的逐步提升,智能配电网建设的开展,未来配电网拓扑的变化将易于实现,因此供电能力的评估方法应基于多次转供前提开展,应当充分挖掘配电网运行的灵活性。然而,一旦考虑多次转供,该问题的复杂度就会大幅提升。多次转供涉及到的拓扑变化情形数量庞大,若采用基于线性规划的传统方法,需要针对单个 $N-1$ 故障下每一种可能的拓扑情形建立数学模型,并讨论不同 $N-1$ 故障下的可能拓扑情形的组合方案,然后求解得到所有组合方案中的最大值,该过程将会产生组合爆炸,显然传统方法无法适用求解多次转供情形。作为底层计算,配电网最大供电能力评估的准确与否将直接影响后续的上层研究。因此,需要提出更为充分、有效、简洁的配电网最大供电能力评估模型。

基于此,本文提出了一种能涵盖多次转供情形的配电网最大供电能力评估模型,充分挖掘既有配电网的供电潜力,破解了传统方法在该问题上的局限性。传统方法通过指定 $N-1$ 故障情形下的转供方式,建立等式约束,用线性规划模型求解最大负荷。本文不指定 $N-1$ 故障情形下的转供方式,以系统负荷之和最大为目标函数,并设定粒子 $N-1$ 校验不通过时的罚函数,进而对问题求解。本文第 1 节详细论述了传统最大供电能力评估方法的缺陷。第 2 节提出了配电网的路径描述方式,并以路径通断状态为变量建立配电网安全约束,最后给出 $N-1$ 安全校验的 0-1 型整数规划模型。第 3 节将粒子群算法应用于最大供电能力的求解,并给出了算法的整体流程。经算例对比验证,证实本文方法可以更为有效、

充分地评估配电网最大供电能力。

1 现有配电网最大供电能力评估模型缺陷

类似于输电系统的可用输电能力,配电网的最大供电能力是指在 $N-1$ 安全准则约束下,某区域配电网考虑负荷转供所能供应的最大负荷^[11]。现有研究在计算配电网最大供电能力时,基本只考虑了 $N-1$ 故障情形下负荷的一层转供,即只考虑了故障主变将其原所带负荷转供至相邻的站内主变或站外主变,而未考虑相邻正常主变也可将其原所带负荷转供给其他主变的情况。基于此种假设下的配电网最大供电能力评估限制了失电负荷转供的灵活性,评估结果显然是不充分的。以图 1 简单配电网系统为例进行说明。

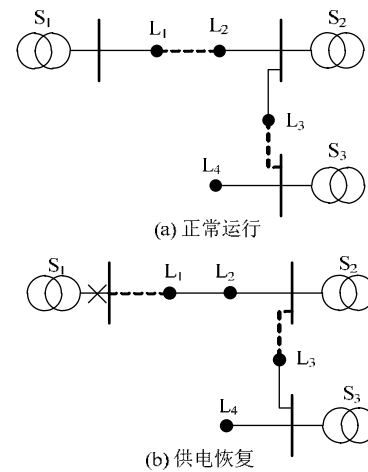


图 1 简单配电网系统

Fig. 1 Simple distribution network system

图 1(a)为系统正常运行的情况。系统包含 3 台主变 S_1 、 S_2 、 S_3 ,容量均为 100 MVA;4 个负荷 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 大小分别为 30、40、40、50 MVA。主变 S_1 、 S_2 、 S_3 的负载率分别为 0.3、0.8、0.5。考虑主变 S_1 故障退出运行,此时负荷 L_1 失电。若只考虑一层转供,即只考虑失电负荷转供至相邻主变,则 L_1 由主变 S_2 供电,主变 S_2 负载率增至 1.1 过载,不能满足系统安全运行约束条件,故系统将失去负荷 L_1 。因此,传统最大供电能力评估方法会认为此种负荷分布下系统不能满足 $N-1$ 约束。若考虑二次转供,即进一步考虑相邻主变 S_2 也可转供其原带载负荷的情况,主变 S_2 先将负荷 L_3 转供至 S_3 ,再带载负荷 L_1 ,此时 S_2 、 S_3 的负载率分别为 0.7、0.9,系统依然可以正常运行,则该负荷分布可以通过主变 S_1 故障的 $N-1$ 校验。

综上,传统评估方法因为只考虑了一次转供,对系统供电能力的评估显得偏为保守,不能充分挖掘既有建设下的配电网供电潜力。为可以充分挖掘

配电网的供电潜力，考虑所有可能的拓扑变化情形，本文采用了基于路径描述的配电网建模，下一节将详细介绍。

2 基于路径描述的配电网供电能力评估模型

影响配电网最大供电能力的主要电气设备是馈线和主变，而最大供电能力的受端是挂载于各馈线以下的负荷。从图论角度来看，馈线支路是带有载流量约束的边，主变则是带有容量约束的源点，而负荷是带有固定功率需求的受点。对于配电网点、边拓扑关系的描述，最常见的方式是用关联矩阵。但基于关联矩阵的拓扑描述，在配电网辐射状约束控制上，会相对较为困难。相比之下，基于路径的配电网拓扑描述，可将辐射状约束简化为等式约束，并且使配电网 $N-1$ 安全校验转换为 0-1 型整数规划问题。

2.1 配电网的路径描述

配电网具有多电源、成环设计的特点，因此每一个负荷点均有多种供电方案。定义以某一电源点为起点，以另一负荷点为终点的链为一条路径。配电网的电源节点集合为

$$S_{\text{set}} = \{s_1, s_2, \dots, s_{N_s}\} \quad (1)$$

式中 s_j 为第 j 个电源点， N_s 为电源点总数。负荷节点集合为

$$L_{\text{set}} = \{l_1, l_2, \dots, l_{N_L}\} \quad (2)$$

式中 l_i 为第 i 个负荷点， N_L 为负荷点总数。支路集合为

$$B_{\text{set}} = \{b_1, b_2, \dots, b_{N_B}\} \quad (3)$$

式中 b_m 为第 m 条支路， N_B 为支路总数。

定义 π_k^i 为以负荷点 l_i 为终点的第 k 条路径。用集合 Π_N^i 表示所有以负荷点 l_i 为终点的路径集合：

$$\Pi_N^i = \{\pi_1^i, \pi_2^i, \dots, \pi_{P_i}^i\} \quad (4)$$

式中 P_i 为该路径的条数。相应地，用 0-1 状态量 W_k^i 来表示对应路径的通断状态，0 表示路径 π_k^i 断开，1 则表示路径连通。路径 π_k^i 连通的充要条件为该路径中的所有支路均为连通状态。同时，定义 Π_S^j 为起点是电源点 s_j 的所有路径的集合， Π_B^m 为经过支路 b_m 的所有路径的集合， $\Pi_P^{bl,i}$ 为以负荷点 l_i 为终点经过支路 b_l 的所有路径的集合， $\Pi_P^{bl,j}$ 为以负荷点 l_j 为终点经过支路 b_l 的所有路径的集合。

2.2 配电网运行的约束条件

1) 电源容量约束。

电源点 s_j 所供负荷之和应小于该电源点的容量，即

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi_S^j} W_k^i \cdot L_i \leq S_j \quad (5)$$

式中： L_i 为负荷点 l_i 的负荷值； S_j 为电源点 s_j 的容量值。

2) 支路载流量约束。

流经支路 b_m 的功率值应小于其载流量上限，即

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi_B^m} W_k^i \cdot L_i \leq B_m \quad (6)$$

式中 B_m 为支路 b_m 的载流量上限。

3) 辐射状约束。

配电网的运行需要满足辐射状约束，任意负荷点的供电路径集 Π_N^i 中均只有一条供电路径是连通的，即

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi_N^i} W_k^i = 1, \quad \forall i \quad (7)$$

同时，若路径 π_k^i 为通路，则包含在路径 π_k^i 内的任意路径 π_m^l 也是通路，即

$$W_k^i \leq W_m^l, \quad \forall \pi_m^l \subset \pi_k^i \quad (8)$$

2.3 配电网 $N-1$ 安全约束

在 $N-1$ 安全准则约束下，配电网运行不仅要满足约束式(5)–(8)，还要保证当系统任一设备故障时，所有的负荷均不断电。相比之下，配电网主变故障为最严重的故障情况，因此只需要校验所有单个主变故障的情况系统是否失负荷，即可判断当前负荷分布下，系统是否能通过 $N-1$ 校验。采用文献[23]中已证明的开关操作数表达式最小为优化目标函数，设集合 I_s 表示原运行方式下联络开关所在支路的集合，集合 D_s 表示分段开关所在支路的集合。当主变 $t(t=1, 2, \dots, N_s)$ 故障退出运行时，该故障情形下的 $N-1$ 校验可用如下 0-1 型整数规划问题表示。由于城市配电线路较短，本文采用文献[11]一样的思路，忽略电压约束。

$$\min \left[\sum_{b_l \in I_s} \left(\sum_{\pi_k^i \in \Pi_P^{bl,i}} W_k^i + \sum_{\pi_k^j \in \Pi_P^{bl,j}} W_k^j \right) + \sum_{b_l \in D_s} (1 - \sum_{\pi_k^i \in \Pi_P^{bl,i}} W_k^i - \sum_{\pi_k^j \in \Pi_P^{bl,j}} W_k^j) \right] \quad (9)$$

$$\begin{cases} \sum_{\pi_k^i \in \Pi_S^j} W_k^i \cdot L_i \leq S_j, & j \neq t \\ \sum_{\pi_k^i \in \Pi_S^t} W_k^i \cdot L_i = 0 \\ \sum_{\pi_k^i \in \Pi_B^m} W_k^i \cdot L_i \leq B_m \\ \sum_{\pi_k^i \in \Pi_N^i} W_k^i = 1, \quad \forall i \\ W_k^i \leq W_m^l, \quad \forall \pi_m^l \subset \pi_k^i \end{cases}$$

若问题存在解，则该故障情形能通过安全校验。系统存在 N_s 个主变，则需重复进行 N_s 次不同主变故障情形的校验。

路径描述方法以电源、负荷为始、末点，罗列

了所有可能的供电路径，而任一供电路径集的通断状态向量，描述了一种可能的配电网拓扑。进而，所有的供电路径集的通断状态向量与所有可能存在的配电网拓扑形成一一对应的关系。

2.4 配电网供电能力评估模型

综上，配电网最大供电能力评估可以通过求解以系统负荷之和最大为目标函数，式(9)为约束的优化问题得到。问题的目标函数如式(10)所示。

$$\begin{aligned} \max \quad & \text{TSC} = \sum_{i=1}^{N_L} L_i \quad (10) \\ \text{s.t.} \quad & \text{式(9)} \end{aligned}$$

式中 TSC 为配电网最大供电能力。

求解式(10)过程中，约束式(9)没有指定负荷的转带关系，故能完整考虑故障情形下所有可能的多层转供方式，有效破解了传统方法的局限性。此外，求解式(10)后不仅能够得到配电网最大供电能力的值，还能够获得各主变 N-1 故障情形下满足安全约束的路径状态，并以路径集的通断状态向量反馈形成最终的转供方案。

3 基于粒子群算法的配电网最大供电能力求解

在求解 2.4 节中模型时，可以将负荷分布的求解与 N-1 安全校验进行解耦，即负荷分布值是作为 N-1 安全校验的传入参数，而 N-1 安全校验的结果又是作为该种负荷分布可行与否的评判标准。基于此，本文采用智能启发式算法框架，并将 N-1 安全校验结果纳为适应度值的影响因素。因为粒子群算法具有鲁棒性好、易于实现、计算效率高等优点，本文设计了针对本文模型的粒子群算法。将各负荷点的负荷值作为粒子的坐标向量，以系统负荷之和最大为目标函数，并设立 N-1 约束罚函数。算法求解得到最优粒子，不仅可以获得该粒子对应的配电网最大供电能力值，同时可以获得该负荷分布下各主变 N-1 故障的转供策略。

3.1 粒子群算法

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)^[24] 源于对鸟类捕食行为的观察，最早由 Kennedy 和 Eberhart 提出。粒子群算法迭代过程中的速度更新公式如下：

$$\begin{aligned} v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t), \\ d = 1, 2, \dots, D \quad (11) \end{aligned}$$

式中： ω 为惯性权重，表示粒子对当前速度有多少惯性保留； c_1 、 c_2 为学习系数，分别表示粒子对自身最优位置和对全局最优位置的学习程度，为非负

实数； $r_1, r_2 \in (0,1)$ ，是每次迭代中的随机生成数； d 表示当前速度更新的维度； D 为系统总维数； x_{id}^t 为第 t 次迭代后，粒子 i 的第 d 维坐标； p_{id}^t 为第 t 次迭代后，粒子 i 的历史最优位置的第 d 维坐标； p_{gd}^t 为第 t 次迭代后，全局最优位置的第 d 维坐标； v_{id}^t 为第 t 次迭代后，粒子 i 的第 d 维速度。

速度更新后，对各粒子坐标进行更新，坐标更新公式如下：

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (12)$$

3.2 配电网最大供电能力求解流程

设定粒子群算法中各粒子的维度为系统负荷数 N_L ，即每一维坐标代表一个负荷点的负荷大小，而粒子的坐标向量代表了负荷的整体分布情况。然后用 2.3 节中的式(9)对粒子对应的负荷分布进行各类主变故障的 N-1 校验。若某粒子 i 能通过全部 N-1 校验，则设定该粒子的适应度值为系统所有负荷之和，即该粒子的所有坐标之和；反之，若粒子 i 不能通过全部的 N-1 校验，则应用罚函数，设定该粒子的适应度值(记为 F_{fitness})为 0。

$$F_{\text{fitness}i} = \begin{cases} \sum_{d=1}^{N_L} x_{id}^t, & \text{通过全部 } N-1 \text{ 校验} \\ 0, & \text{未通过全部 } N-1 \text{ 校验} \end{cases} \quad (13)$$

基于粒子群算法的配电网最大供电能力求解算法的流程如图 2 所示。首先，读取配电网信息，构建拓扑模型，然后基于深度优先原则，完成路径搜索^[25]，建立各路径集合。最后使用粒子群算法求解满足 N-1 校验的系统最大供电能力，算法输出最

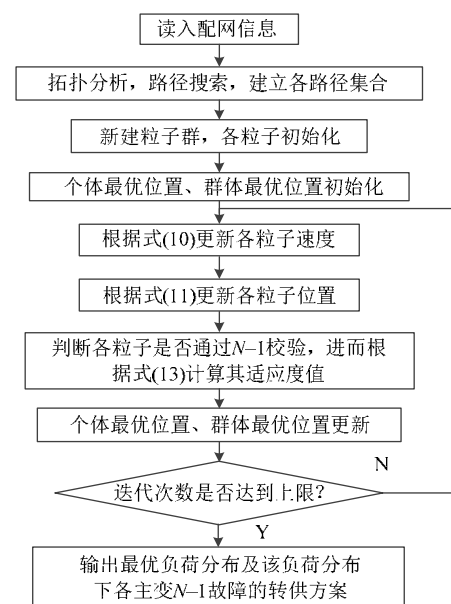


图 2 配电网最大供电能力求解算法流程
Fig. 2 Flow chart of the algorithm for solving the maximum power supply capability of the distribution network

优粒子的坐标向量即系统最优负荷分布下各负荷点的负荷值,该最优粒子经过主变 $N-1$ 故障校验所得路径集的通断状态向量,即对应主变故障情形下的转供方案。

4 算例分析

采用文献[11]中算例验证本文算法的有效性。算例包含主变 $S_1 \sim S_6$,容量分别为 40、40、40、40、63、63 MVA。在 $N-1$ 约束下,当最大容量主变退出运行时,系统所有负荷均不能失电,因此该算例最大供电能力上限为 223 MVA。系统共有 38 个常闭分段开关,9 个常开联络开关。算例网络如图 3 所示。

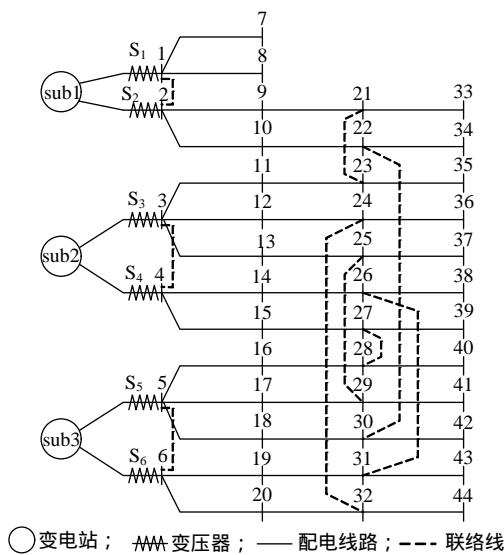


图 3 算例网络

Fig. 3 Example network

文献[11]因未考虑多次转供,计算结果为 211.2 MVA,离上限值还有 11.8 MVA 的剩余供电容量。通过本文方法,首先搜索建立负荷的供电路径集,得到全系统共包含 2086 条供电路径。然后使用粒子群算法迭代计算,设定粒子个数为 20,最大迭代次数为 50,算法迭代收敛过程如图 4 所示。最终计算得到满足所有 $N-1$ 故障情形的系统最大供电能力为 219.018 MVA,相对文献[11]计算结果,挖掘了约 66.3% 的剩余供电容量。此时主变负载率

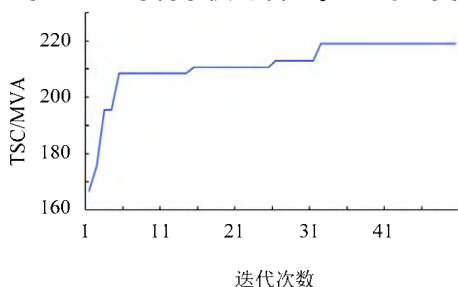


图 4 算法迭代收敛

Fig. 4 Iterative convergence graph of algorithm

向量 $T_{TSC} = [0.975, 0.629, 0.787, 0.725, 0.878, 0.620]$,各负荷计算值大小如表 1 所示。

表 1 负荷计算值

Tab. 1 Load calculation value

负荷	负荷值/MVA	负荷	负荷值/MVA	负荷	负荷值/MVA
L ₁	5.750	L ₂	0.949	L ₃	0
L ₄	0.831	L ₅	1.811	L ₆	5.056
L ₇	32.345	L ₈	0.920	L ₉	5.681
L ₁₀	0	L ₁₁	0	L ₁₂	8.119
L ₁₃	1.682	L ₁₄	0	L ₁₅	0.085
L ₁₆	1.085	L ₁₇	6.335	L ₁₈	4.996
L ₁₉	0.418	L ₂₀	19.802	L ₂₁	18.284
L ₂₂	0.254	L ₂₃	13.093	L ₂₄	3.021
L ₂₅	0	L ₂₆	0.498	L ₂₇	0.112
L ₂₈	0.987	L ₂₉	11.894	L ₃₀	12.385
L ₃₁	0	L ₃₂	1.907	L ₃₃	0
L ₃₄	0	L ₃₅	1.756	L ₃₆	2.789
L ₃₇	1.033	L ₃₈	4.290	L ₃₉	23.190
L ₄₀	7.142	L ₄₁	0.847	L ₄₂	7.804
L ₄₃	11.071	L ₄₄	0.796		

对上述负荷分布下的配电网进行 $N-1$ 安全检验。考虑最恶劣情况,依次将各主变设为故障,得到满足配电网安全运行约束的转供方案,见附录图 A1。各故障情形下,主变 $S_1 \sim S_6$ 的负载率如图 5 所示,其中横轴“—”对应无故障情况,主变均不发生过载。

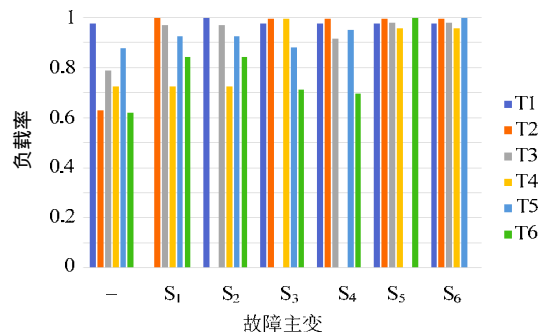


图 5 主变负载率

Fig. 5 Load rates of transformers graph

以主变 S_1 故障情形为例,说明本文方法对配电网最大供电能力评估的充分性,传统方法与本文方法转供方式的对比如表 2 所示。当主变 S_1 故障退出运行时,负荷 L_1 、 L_7 、 L_8 失电,需要由主变 S_2 来转带。传统方法仅考虑一次转供,即主变 S_2 既要维持对负荷 L_2 、 L_9 、 L_{10} 、 L_{21} 、 L_{22} 、 L_{33} 、 L_{34} 的供电,还要转带负荷 L_1 、 L_7 、 L_8 。上述负荷的累加值为 64.183 MVA,超过了主变 S_2 的额定容量,则传统方法评估下,该负荷分布无法通过 $N-1$ 检验,评估结果偏于保守。本文方法涵盖考虑了多次转供情形,如附录图 A1(a)所示,负荷 L_9 、 L_{21} 、 L_{33} 由主变 S_3 转带,负荷 L_{10} 、 L_{22} 、 L_{34} 由主变 S_5 转带,主变 S_2 只转带失电负荷 L_1 、 L_7 、 L_8 和原有负荷 L_2 ,

表 2 主变 S_1 故障下负荷转供方式
Tab. 2 Load transfer mode of transformer S_1 fault

主变	传统方法带载负荷	传统方法主变负载率	本文方法带载负荷	本文方法主变负载率
S_2	$L_1, L_2, L_7, L_8, L_9, L_{10}, L_{21}, L_{22}, L_{33}, L_{34}$	1.605	L_1, L_2, L_7, L_8	0.999
S_3	$L_3, L_{11}, L_{12}, L_{13}, L_{23}, L_{24}, L_{25}, L_{35}, L_{36}, L_{37}$	0.787	$L_3, L_9, L_{11}, L_{21}, L_{23}, L_{33}, L_{35}$	0.970
S_4	$L_4, L_{14}, L_{15}, L_{26}, L_{27}, L_{38}, L_{39}$	0.725	$L_4, L_{14}, L_{15}, L_{26}, L_{27}, L_{38}, L_{39}$	0.725
S_5	$L_5, L_{16}, L_{17}, L_{18}, L_{28}, L_{29}, L_{30}, L_{40}, L_{41}, L_{42}$	0.878	$L_5, L_{10}, L_{13}, L_{16}, L_{17}, L_{18}, L_{22}, L_{25}, L_{28}, L_{29}, L_{30}, L_{34}, L_{37}, L_{40}, L_{41}, L_{42}$	0.925
S_6	$L_6, L_{19}, L_{20}, L_{31}, L_{32}, L_{43}, L_{44}$	0.620	$L_6, L_{12}, L_{19}, L_{20}, L_{24}, L_{31}, L_{32}, L_{36}, L_{43}, L_{44}$	0.841

主变 S_3 再将原挂载负荷 L_{13} 、 L_{25} 、 L_{37} 转带至 S_5 ，将原挂载负荷 L_{12} 、 L_{24} 、 L_{36} 转带至 S_6 。经过 3 层转带后，各主变均无过载，系统通过主变 S_1 故障下的 $N-1$ 校验。因此本文方法可以更为充分地对配电网最大供电能力进行评估，挖掘了现有建设下满足 $N-1$ 安全约束的配电网供电潜力。

5 结论

配电网最大供电能力的评估能为配电网的建设发展提供指导性建议，而现有评估模型未考虑负荷的多次转供，限制了负荷转供的灵活性，因此评估结果偏于保守，不能充分挖掘既有建设配电网的供电潜力。针对此，本文提出了一种方法，能够考虑 $N-1$ 故障情形下所有可能的多次转供方式，破解了传统方法的局限性。首先基于路径描述方式，建立负荷的供电路径集。然后以路径的通断状态为变量，以系统负荷之和最大为目标函数，配电网 $N-1$ 安全校验条件为约束条件，建立了配电网最大供电能力评估模型。最后采用粒子群算法求解该问题，并设计了粒子 $N-1$ 校验不通过时的罚函数。传统方法因只考虑一次转供，还存在很大的剩余供电容量。经算例证实，本文方法可以进一步挖掘该剩余供电容量，挖掘率可达 66.3%。

本文方法可以有效、充分地配电网最大供电能力进行评估，并能对各主变 $N-1$ 故障情形，提出安全、可靠的失电负荷转供策略，提升了配电网的故障应急能力。下一步将在本文已有成果的基础上，展开分布式电源对配电网供电能力的影响和配电网规划设计的研究工作。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/volumn/current.shtml>)。

参考文献

[1] 甄国栋, 高新智, 于树刚, 等. 配电网的剩余供电能力实用模型[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3420-3428.
Zhen Guodong, Gao Xinzhi, Yu Shugang, et al. The practical residue supply capability model of distribution network[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3420-3428(in Chinese).

[2] 孙丰杰, 谢宁, 王承民, 等. 2017 年国际供电会议配电系统规划研究成果综述[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2733-2741.
Sun Fengjie, Xie Ning, Wang Chengmin, et al. Review of CIRED 2017 on power distribution system planning[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2733-2741(in Chinese).

[3] 张曦, 刘友波, 吕林, 等. 计及高压配电网负荷转供的城市 220 kV 片区电网供电能力分析[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1612-1618.
Zhang Xi, Liu Youbo, Lü Lin, et al. Total supply capability analysis of urban 220 kV area power system considering load transfer capability of HV distribution network[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1612-1618(in Chinese).

[4] 荆朝霞, 王宏益, 江昌旭. 考虑负荷均衡的 220 kV 电网供电能力多目标优化[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1619-1626.
Jing Zhaoxia, Wang Hongyi, Jiang Changxu. Multi-objective optimization of power supply capability of 220 kV power grid concerning load balance[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1619-1626(in Chinese).

[5] 肖峻, 张苗苗, 司超然, 等. 配电网的供电能力分布[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3326-3332.
Xiao Jun, Zhang Miaomiao, Si Chaoran, et al. Supply capability distribution of distribution systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3326-3332(in Chinese).

[6] 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(in Chinese).

[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): 36-38(in Chinese).

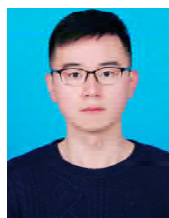
[8] 邱丽萍, 范明天. 城市电网最大供电能力评价算法[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 68-71.
Qiu Liping, Fan Mingtian. A new algorithm to evaluate maximum power supply capability of urban distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 68-71(in Chinese).

[9] 国家电网公司. Q/GDW 156—2006 城市电力网规划设计导则[S]. 2006.

[10] 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 interconnection of main transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 86-91(in Chinese).

[11] 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. A supply capability model for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 47-52(in Chinese).
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 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(in Chinese).
- [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. A security region model for smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 14-19(in Chinese).
- [15] 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 & Control, 2015, 43(20): 36-44(in Chinese).
- [16] 肖峻, 祖国强, 白冠男, 等. 配电系统安全域的数学定义与存在性证明[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4828-4836.
Xiao Jun, Zu Guoqiang, Bai Guannan, et al. Mathematical definition and existence proof of distribution system security region[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4828-4836(in Chinese).
- [17] 肖峻, 左磊, 祖国强, 等. 基于潮流计算的配电系统安全域模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4941-4949.
Xiao Jun, Zuo Lei, Zu Guoqiang, et al. Model of distribution system security region based on power flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4941-4949(in Chinese).
- [18] 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+31.
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+31(in Chinese).
- [19] 肖峻, 张婷, 张跃, 等. 基于最大供电能力的配电网规划理念与方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 106-113.
Xiao Jun, Zhang Ting, Zhang Yue, et al. TSC-based planning idea and method for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 106-113(in Chinese).
- [20] 肖峻, 祖国强, 李晓辉, 等. 基于最大供电能力的配电网馈线联络建设次序规划方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 49-55.
Xiao Jun, Zu Guoqiang, Li Xiaohui, et al. A TSC-based planning method on construction order of feeder links for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 49-55(in Chinese).
- [21] 杨汾艳, 张跃, 曾杰, 等. 计及分布式光伏配电网供电能力计算方法[J]. 中国电力, 2016, 49(12): 150-155.
Yang Fenyan, Zhang Yue, Zeng Jie, et al. Calculation method of power supply capacity of distribution network considering distributed PV[J]. Electric Power, 2016, 49(12): 150-155(in Chinese).
- [22] 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(1): 33-43.
Guo Yanlin, Liu Junyong, Wei Zhenbo, et al. Load supply capacity of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018(1): 33-43(in Chinese).
- [23] 孙明, 董树锋, 夏圣峰, 等. 基于路径描述的馈线分区 N-1 可装机容量计算方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 123-129.
Sun Ming, Dong Shufeng, Xia Shengfeng, et al. Path description based calculation method for available capacity of feeder partition satisfied with N-1 security criterion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 123-129(in Chinese).
- [24] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]//Proc. IEEE Int'l Conf. on Neural Networks, Piscataway, NJ, 1995: 1942-1948.
- [25] 徐成司, 董树锋, 孙洲, 等. 基于网络简化和深度优先遍历的配电网路径搜索算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 170-176.
Xu Chengsi, Dong Shufeng, Sun Zhou, et al. A path searching algorithm for distribution network based on network simplification and depth first traversal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 170-176(in Chinese).



朱嘉麒

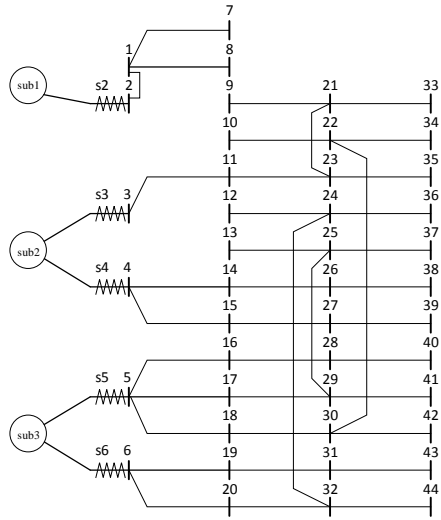
收稿日期: 2018-09-11。

作者简介:

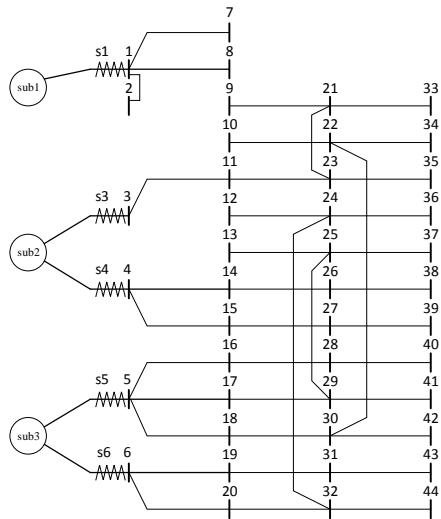
朱嘉麒(1994), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网优化运行, E-mail: 21710089@zju.edu.cn;
董树锋(1982), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为状态估计和有源配电网分析等, E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn.

(责任编辑 马晓华)

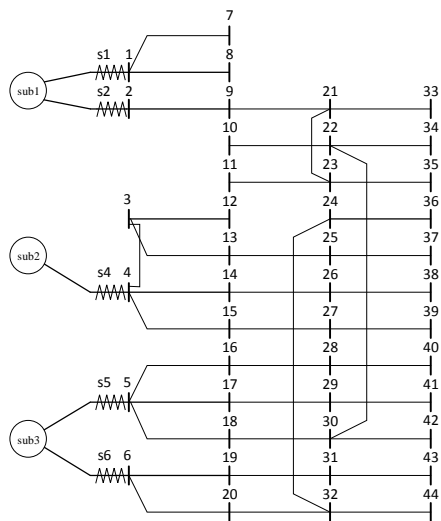
附录 A



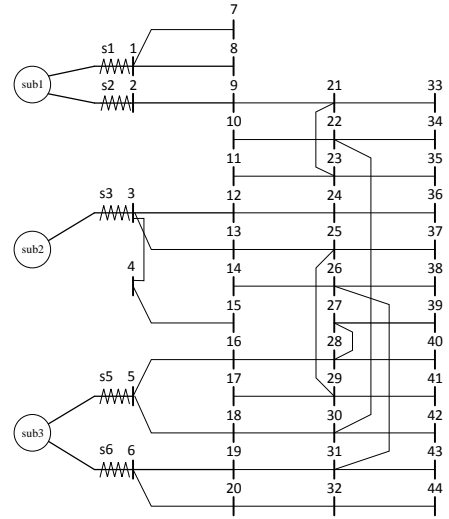
(a) 主变 S_1 故障



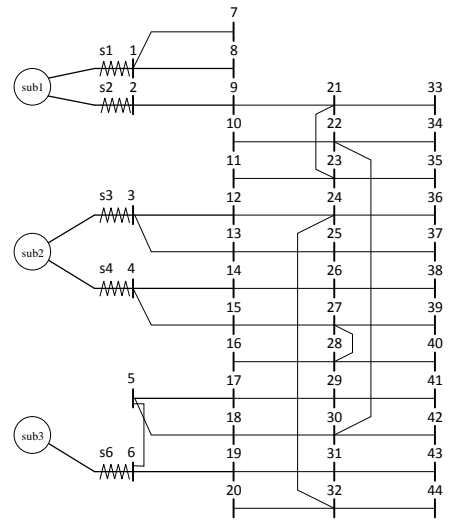
(b) 主变 S_2 故障



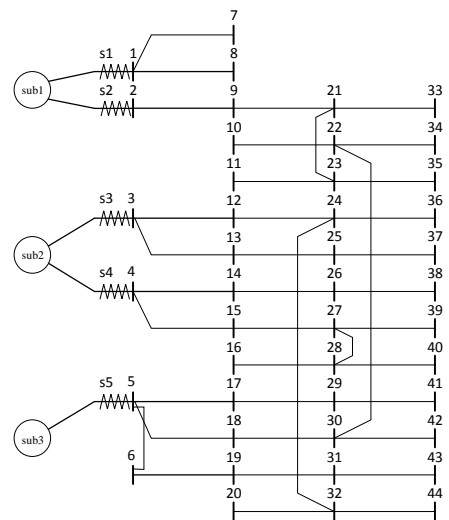
(c) 主变 S_3 故障



(d) 主变 S_4 故障



(e) 主变 S_5 故障



(f) 主变 S_6 故障

图 A1 $N-1$ 主变故障转供方案

Fig. A1 $N-1$ transformer fault transfer scheme