

基于路径描述模型的城市电网负载均衡方法

徐奇锋¹, 马翔², 朱嘉麒³, 董树锋³, 卢开诚³

- (1. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310007;
2. 国网浙江省电力有限公司金华供电公司, 浙江 金华 321000;
3. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 负载均衡是降低城市电网运行风险、提高系统运行质量的有效手段, 但现有负载均衡研究方法无法兼顾多层转供可能性和方法最优解的获取。对此, 提出一种基于路径描述模型的城市电网负载均衡方法, 以路径通断状态为变量, 将问题转化为混合整数线性规划问题, 将负载率控制纳入约束条件, 同时以开关操作次数最少为目标函数, 求解结果为综合考虑均衡性和可靠性的优化网络拓扑。经算例验证, 该方法可有效降低系统主变压器的平均负载率以及负载率差异波动性, 降低系统损耗, 提升系统可靠性。

关键词: 城市电网; 负载均衡; 路径描述; 综合优化

文章编号: 1007-1881(2020)02-0017-06

DOI: 10.19585/j.zjdl.202002003

中图分类号: TM732

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Load Balancing Method for Urban Power System Based on Path Description Model

XU Qifeng¹, MA Xiang², ZHU Jiaqi³, DONG Shufeng³, LU Kaicheng³

- (1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;
2. State Grid Jinhua Power Supply Company, Jinhua Zhejiang 321000, China;
3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Load balancing is an effective way to reduce the risk of urban power grid operation and improve the operation quality of the system. However, the existing load balancing research methods cannot take account of the possibility of multi-layer transfer and the acquisition of the optimal solution. Therefore, the paper proposes a load balancing method for urban power grid based on path description model. The problem is formulated as a mixed-integer linear programming problem with the on-off state of the path as a variable. The load rate control is incorporated into the constraints, and the objective function aims to minimize the number of switching operations. The result is an optimized network topology considering balance and reliability. Examples show that the proposed method can effectively reduce the average load rate of the main transformer and the fluctuation of load rate difference, reduce system losses and improve system reliability.

Keywords: urban power system; load balancing; path description; comprehensive optimization

0 引言

配电网(以下简称“配网”)作为连接负荷与主网的关键环节, 其运行可靠性直接决定了供电质量的好坏。随着我国经济的迅速发展, 城市用电

负荷与日俱增, 城市既有配网将面临承载新增负荷的压力。如何均衡不同主变压器(以下简称“主变”)搭载的负荷, 降低主变运行风险, 将成为未来城市电网规划的重点内容。

现有对城市电网的研究主要集中在系统最大供电能力评估^[1-6]。文献[1]提出一种基于主变互联系的城市电网最大供电能力评估方法, 忽略了中压层级的配网络结构, 评估模型和方法过于简

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JH180081)

单粗糙。文献[2]在文献[1]的基础上,进一步细化模型,考虑了主变过载能力和主变联络容量约束。文献[3-4]考虑了中压配网的拓扑结构,从馈线层面计算系统的最大供电能力。文献[5]定量分析了单条联络馈线对系统最大供电能力带来的影响。文献[6]利用电力电子开关构成的柔性开闭站将多回馈线联络组网,采用能灵活控制潮流的柔性闭环运行方式,使系统的实际充裕度得以提升。上述文献虽然取得了一定的成效,但是在处理网络重构的过程中均只考虑了单次转供,而未深入挖掘网络多次转供的可能性。文献[7]推导了开、合环引起的降损和载荷均衡指标的变化量估算公式,在此基础上设计了一种网络重构支路交换法的负载均衡思路。文献[8]协调考虑了供电能力最大和负荷均衡度最大的优化目标,采用非支配排序遗传算法搜索多目标 Pareto 前沿,并用熵权理想度排序法折中最优解的决策。文献[7-8]虽然能从全局角度搜索问题的最优可行解,但均采用了启发式算法,因而无法保证解的全局最优性,甚至可能在求解过程中陷入局部最优,而影响最终的优化效果。综上,配网负载均衡问题的关键在于,如何既能完整考虑所有可能的配网重构结构,挖掘配网的供电潜能,同时可以确保解的最优性,最大程度均衡系统负荷分布。

针对上述问题,本文参考文献[9-10]方法,采用了一种基于路径描述的配网建模方式,该方法可以完整描述配网可能存在的拓扑形态,同时能方便地实现配网拓扑的辐射状约束。在此基础上,本文提出基于路径描述的城市电网负载均衡方法,以开关操作次数最少为目标函数,综合考虑配网正常运行的各项约束条件,采用梯度扩张方式逐步控制负载率的上下限,直至系统负载率得到优化。该方法可以兼顾配网操作的灵活性和均衡解的最优性,破解了传统方法的局限,有效提升了城市电网的运行质量。

1 城市电网负载均衡模型的总体思路

城市电网由高压配网、中压配网和低压配网三层网架组成。一般情况下,城市的高压配网各主变是互相断开连接的,负载的转供主要通过中压配网间的联络开关、分段开关的开闭操作来实现。正常运行情况下,城市配网为辐射状。为了能

够完整描述配网的运行方式,采用路径描述模型对配网的供电路径进行建模,构建完整的配网重构方案集。当各主变负载率之间的最大偏差率大于设定上限时,触发主变负载均衡需求,进行负荷重分布操作。在路径模型基础上,建立配网负载重分配的重构优化问题,以开关操作次数最少为目标函数,将负载均衡作为约束条件纳入优化问题中,并考虑支路容量约束、系统辐射状结构约束。若上述问题有解,则可获得解所对应的均衡后的配网拓扑;反之,则以梯度扩张方式扩大负载均衡约束的上下限,重新进行问题求解,直至系统均衡性得到优化。本文方法的整体流程如图1所示。

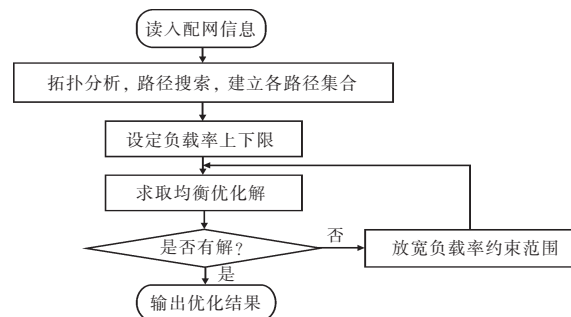


图1 算法流程

2 基于路径描述的城市电网负载均衡方法

2.1 基于路径描述的城市电网建模

在正常工况下,由于配网的辐射状运行约束,任意负荷均有且仅有一个供电电源。所谓路径,即从某一电源出发到某一负荷终止经过的所有支路集合。在配网辐射状运行约束下,以任一负荷为终点的所有路径,有且仅有一条为通路。在此基础上,配网拓扑可以利用路径方式来描述,即完整叙述任意负荷由何电源供电以及采取何种通电路径。此种建模方式下,配网的优化问题可归结为0-1型整数规划问题,便于问题建模和求解。

在建模过程中,可将配电网简化为点线拓扑模型。其中,节点包括负荷节点和电源节点,电源节点对应配网中的供电主变;支路则由网络的线路、断路器简化所得,每一条支路均可进行断开、闭合操作。

定义 π_k^i 为负荷节点 L_i 的第 k 条可能供电路

径, 该路径为连接负荷节点 L_i 与某一电源节点的所有支路的集合。设负荷节点 L_i 共有 p 条可能的供电路径, 若用集合 Π_N^i 表示上述所有供电路径, 则:

$$\Pi_N^i = \{\pi_1^i, \pi_2^i, \dots, \pi_k^i, \dots, \pi_p^i\} \quad (1)$$

定义与 π_k^i 一一对应的二进制变量 W_k^i 描述路径 π_k^i 的通断状态, 则:

$$W_k^i = \begin{cases} 1, & \text{路径 } \pi_k^i \text{ 连通} \\ 0, & \text{反之} \end{cases} \quad (2)$$

以图 2 简单配网系统为例, 说明路径描述的建模方式。该系统共包含 3 个电源(S_1, S_2, S_3)、4 个负荷点(L_A, L_B, L_C, L_D)和 8 条支路。以各电源点为起点, 采用深度优先搜索方式, 可得系统包含路径如表 1 所示。负荷点 L_A, L_B, L_C, L_D 分别存在 3, 3, 3, 1 条供电路径。

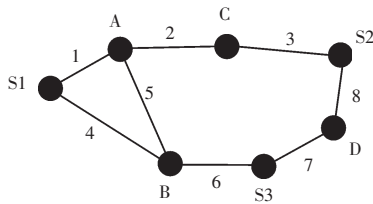


图 2 简单配网系统

表 1 系统供电路径

负荷节点	路径	路径节点
A	π_1^A	S_1, A
	π_2^A	S_1, B, A
	π_3^A	S_2, C, A
B	π_1^B	S_1, B
	π_2^B	S_1, A, B
	π_3^B	S_2, C, A, B
C	π_1^C	S_1, A, C
	π_2^C	S_1, B, A, C
	π_3^C	S_2, C
D	π_1^D	S_2, D

为便于描述配网运行时其他约束条件和支路的通断状态, 定义如下集合:

$$\begin{aligned} \Pi_s^i &= \{\text{由主变 } S_i \text{ 供电的所有路径}\} \\ \Pi_b^i &= \{\text{由主变 } B_i \text{ 供电的所有路径}\} \\ \Pi_p^{B_i, i} &= \{\text{以 } L_i \text{ 为终点经过支路 } B_i \text{ 的所有路径}\} \\ \Pi_p^{B_i, j} &= \{\text{以 } L_j \text{ 为终点经过支路 } B_i \text{ 的所有路径}\} \end{aligned}$$

2.2 配网负载均衡模型

当配网中各主变负载率偏差的最大值大于设定的波动值上限时, 则需要对各主变挂载负荷进行重分配。设城市配网所含主变容量之和为 s_{all} , 所含负荷之和为 l_{all} 。

$$s_{\text{all}} = \sum_{i=1}^{N_s} s_i \quad (3)$$

式中: s_i 为主变 S_i 对应的容量; N_s 为主变数量。

$$l_{\text{all}} = \sum_{i=1}^{N_L} l_i \quad (4)$$

式中: l_i 为负荷 L_i 对应的负荷值; N_L 为负荷数量。

则配网理想负载率为:

$$r_{\text{all}} = l_{\text{all}} / s_{\text{all}} \quad (5)$$

即当前配网负载情况下, 最理想的情况是所有主变的负载率无差别均为 r_{all} , 此时的主变负载率的方差为 0。考虑实际情况, 应在理想负载率的基础上设定裕度范围, 裕度数值用 r_ε 表示。

为降低配网重构过程的操作风险, 提升开关使用寿命, 选取开关操作次数最少为优化目标。

$$\min \left[\sum_{B_i \in I_s} \left(\sum_{\pi_k^i \in \Pi_p^{B_i, i}} W_k^i + \sum_{\pi_k^j \in \Pi_p^{B_i, j}} W_k^j \right) + \sum_{B_i \in D_s} \left(1 - \sum_{\pi_k^i \in \Pi_p^{B_i, i}} W_k^i + \sum_{\pi_k^j \in \Pi_p^{B_i, j}} W_k^j \right) \right] \quad (6)$$

式中: 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。式(6)左边项表示原断开、现闭合的联络开关数, 右边项表示原闭合、现断开的分段开关数。两者之和表示系统的开关操作次数。

城市电网正常运行时, 约束条件包含主变容量约束、支路容量约束、网络辐射状约束。由于本文方法的应用场景为配网运行方式规划, 故对网络的电压、网损做了简化处理^[2, 9]。

2.2.1 主变容量约束

$$r_{\text{all}} - r_\varepsilon \leq \frac{1}{s_j} \sum_{\pi_k^i \in \Pi_i^j} W_k^i l_i \leq r_{\text{all}} + r_\varepsilon, \forall j \quad (7)$$

式(7)表示对任意主变 S_j 所供负荷进行累加求和, 求取主变负载率, 该负载率应位于考虑裕度的理想负载率变化范围中。

2.2.2 支路容量约束

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi_m^i} W_k^i l_i \leq b_m, \forall m \quad (8)$$

式(8)表示求取流经任意支路 b_m 的功率累加和, 该和应小于支路的容量上限。

2.2.3 网络辐射状约束

$$\sum_{\pi_k \in \Pi_k} W_k^i = 1, \forall i \quad (9)$$

式(9)对任意负荷 L_i 的供电路径通断状态进行累加求和, 因为辐射状运行约束要求负荷只能有且仅有一个供电电源, 即供电路径只能有一条为通路, 因此该约束为等式约束, 且累加和为 1。

$$W_k^i \leq W_m^i, \forall \pi_m \subset \pi_k \quad (10)$$

路径的本质为支路集合^[11-18]。对于存在包含关系的两条路径, 当长路径状态为 1 时, 短路径状态必然为 1; 当长路径状态为 0 时, 短路径的状态不固定。因此短路径的状态值必然大于等于长路径。在式(9)、式(10)共同约束下, 可确保网络的连通性与辐射状。

若上述问题存在最优解, 说明可以找到满足负载均衡要求的网络重构方案; 反之, 若问题无解, 则遵循从优到劣的思想, 逐渐放大负载率的裕度范围, 直至均衡性问题得到优化。

设 r_{e0} 为初始裕度, Δr_e 为裕度的变化梯度, 第 i 次迭代裕度值的计算公式为:

$$r_e = r_{e0} + (i-1)\Delta r_e \quad (11)$$

3 算例

本文采用某实际电网算例对本文方法进行验证, 算例网络如图 3 所示。算例共包含 6 台主变 s1-s6, 容量分别为 40 MVA, 40 MVA, 40 MVA, 40 MVA, 63 MVA, 63 MVA。配网的负荷值如表

2 所示。此时全网主变容量之和 $s_{all}=286$ MVA, 全网负荷 $l_{all}=202$ MVA, 则配网理想负载率为 0.706。初始裕度 r_{e0} 选取 5.0%, 裕度变化梯度 Δr_e 选取 1.0%, 则初始问题主变负载率上限为 0.756, 下限为 0.656。在第 4 次迭代中, 即当负载率上限为 0.786, 下限为 0.626 时, 问题存在优化解, 最少的开关操作次数为 8 次, 支路 10-22, 支路 11-23, 支路 14-26, 支路 16-28 需要断开; 支路 21-23, 支路 22-30, 支路 26-31, 支路 27-28 需要闭合。经上述操作后的负载均衡网络如图 4 所示。

表 2 配网负荷值

负荷	负荷值/MVA	负荷	负荷值/MVA	负荷	负荷值/MVA
L ₁	5.0	L ₁₆	5.0	L ₃₁	5.0
L ₂	2.0	L ₁₇	5.0	L ₃₂	5.0
L ₃	2.0	L ₁₈	5.0	L ₃₃	5.0
L ₄	2.0	L ₁₉	5.0	L ₃₄	5.0
L ₅	5.0	L ₂₀	5.0	L ₃₅	2.0
L ₆	5.0	L ₂₁	5.0	L ₃₆	2.0
L ₇	15.0	L ₂₂	5.0	L ₃₇	2.0
L ₈	10.0	L ₂₃	4.0	L ₃₈	5.0
L ₉	5.0	L ₂₄	4.0	L ₃₉	5.0
L ₁₀	5.0	L ₂₅	5.0	L ₄₀	2.0
L ₁₁	5.0	L ₂₆	5.0	L ₄₁	2.0
L ₁₂	5.0	L ₂₇	5.0	L ₄₂	2.0
L ₁₃	5.0	L ₂₈	3.0	L ₄₃	5.0
L ₁₄	6.0	L ₂₉	3.0	L ₄₄	5.0
L ₁₅	6.0	L ₃₀	3.0	—	—

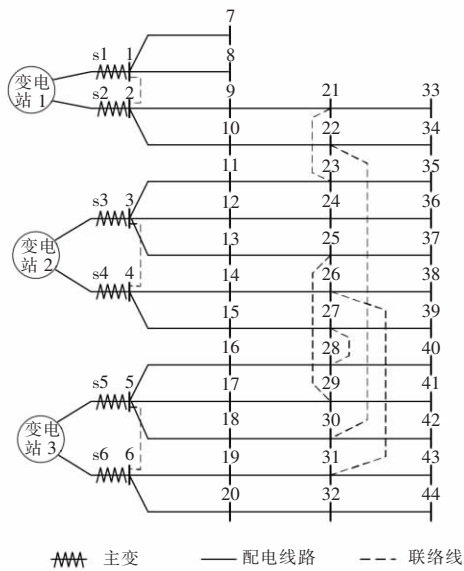


图 3 算例网络

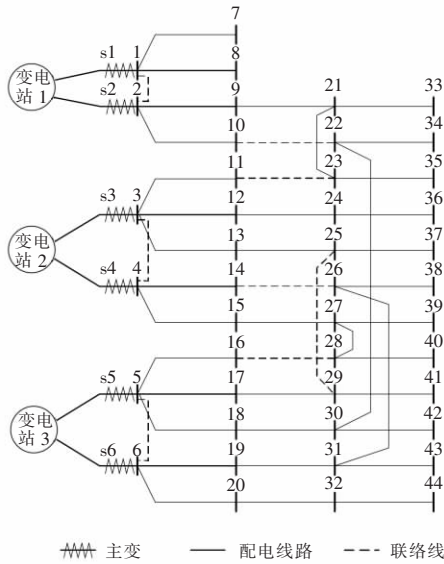


图 4 紧约束下负载均衡后的网络

负载均衡前, 主变 s1—s6 的负载率分别为 0.75, 0.8, 0.9, 0.85, 0.56, 0.56, 负载率均值为 0.737, 负载率标准差为 0.146; 负载均衡后, 主变 s1—s6 的负载率分别为 0.75, 0.7, 0.75, 0.725, 0.635, 0.73, 负载率均值为 0.715, 负载率标准差为 0.043。负载均衡前后的主变负载率变化情况如图 5 所示, 可见, 经负载均衡后, 系统整体的负载率一定程度下降, 且各主变间的负载率差异波动大幅减小, 系统整体更接近理想负载率。

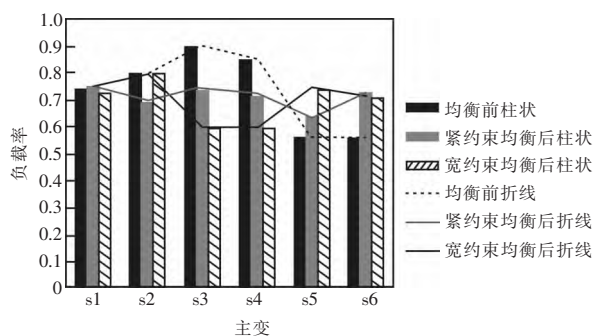


图 5 主变负载率变化

若进一步放宽负载率的裕度范围至上限为 0.816, 下限为 0.596, 可得优化解如图 6 所示, 此时开关动作次数为 4 次。主变 s1—s6 的负载率分别为 0.75, 0.8, 0.6, 0.6, 0.746, 0.714, 负载率均值为 0.702, 负载率标准差为 0.083。负载率进一

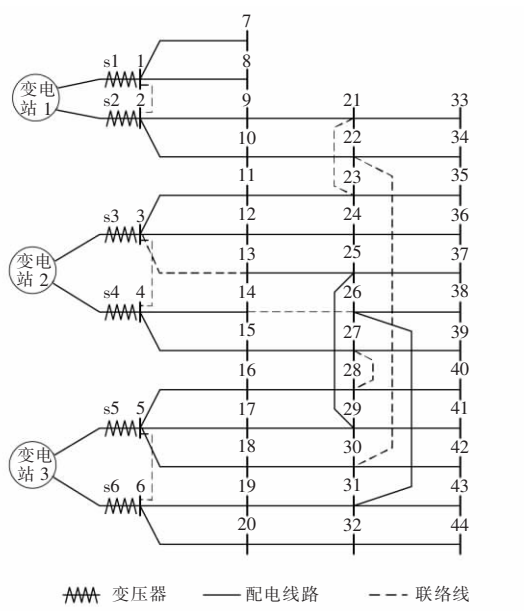


图 6 宽约束下负载均衡后的网络

步下降, 说明更多的负荷转由高容量主变带载, 由此缓解低容量主变的重载工况。

4 结语

本文提出一种基于路径描述模型的城市电网负载均衡方法。采用路径描述建立了城市电网的优化模型, 路径变量可以完整表达所有可能的拓扑结构, 进而充分挖掘既有配网的转供潜能, 拓宽负载均衡可能的调控方式。将负载率作为约束条件纳入模型中, 可以根据系统的实际均衡需求, 柔性调整约束的上下限, 进而得到综合最优的负载均衡解。

经算例验证, 本文所提方法可以有效降低系统主变平均负载率, 使重载主变负荷转移至轻载主变, 同时使主变负载率的差异波动性降低, 使得负荷分配更均匀、更合理。该方法能有效提升负载不均衡城市电网的运行质量, 降低运行损耗和运行风险, 提高系统可靠性。

参考文献:

- [1] 王成山, 罗凤章, 肖峻, 等. 基于主变互联系数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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 肖峻, 谷文卓, 贡晓旭, 等. 基于馈线互联系数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.
- [5] 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.
- [6] 肖峻, 刚发运, 黄仁乐, 等. 柔性配电网的最大供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 30-38.
- [7] 汲国强, 吴文传, 张伯明, 等. 以降损和负荷均衡为目标的地区电网网络重构快速算法[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 172-178.
- [8] 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): 1619-1628.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 蔡玺,屈伟,李秋燕.一种电网云平台资源调度算法的研究[J].四川电力技术,2018,41(4):19-22.
- [12] 杨烁,杨卫红,刘艳茹,等.考虑电能替代负荷接入的配电网鲁棒重构优化[J].电力工程技术,2019,38(4):48-55.
- [13] 舒舟,杜佩仁,张杰,等.市场化环境下的电力平衡及变电容量需求计算方法研究[J].电力大数据,2018,21(3):15-21.
- [14] 连亦承,喻鹏,亓峰,等.一种面向负载均衡的电力 OTN 路由优化算法[J].广东电力,2018,31(5):42-48.
- [15] 刘亚南,徐研,韩华春,等.多端背靠背柔性直流互联系统负载均衡[J].电力工程技术,2018,37(3):84-90.
- [16] 朱英伟,李宇泽,侯建生,等.基于变电站全停场景的负荷转移能力评估方法研究及应用[J].电力大数据,2018,21(3):27-32.
- [17] 郭林,李杰.面向提高供电能力的中压配电网架精细化规划方法[J].电网与清洁能源,2018,34(1):8-14.
- [18] 卫鹏杰,韩卫恒,贺卫华.光伏持续投产对山西电网统配用电负荷影响的分析[J].山西电力,2019(1):6-9.

收稿日期:2019-10-10

作者简介:徐奇锋(1980),男,高级工程师,主要研究方向为大电网运行控制。

(本文编辑:方明霞)