

文章编号:1000-582X(2002)05-0029-04

基于最优化原理和分层模型的配电网负荷均衡

林景栋, 曹长修, 张邦礼

(重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘要:配电网负荷均衡是降低配电网线损、优化配电网运行的一个目标,随着配电网顶点数量的增加,可能的负荷组合数量急剧增加,基于传统电网模型的优化方法难以实现负荷最优组合。笔者分析了配电网负荷均衡的特点,并将该特点与最优化原理相结合,采用分层的拓扑模型为手段,提出了配电网各源点的负荷最优均衡的原理及原理的实现算法,从而将最优问题转为多阶段决策问题,并实现了配电网的负荷最优均衡。

关键词:最优化原理;负荷均衡;分层模型;网络重构

中图分类号:TM71

文献标识码:A

降低配电网线损一直是电力企业努力的方向。早在1975年,Merlin和Back就指出配电网网络重构是降低线损的有效途径,通过网络重构还可以均衡负荷、消除过载、提高供电电压质量^[1]。配电网一般具有闭环设计,开环运行的特点,为了提高供电可靠性及运行的灵活性,配电沿线上设有分段开关,在馈线入口处设有联络开关。配电网的这一特点,使得其网络结构可以重构即通过改变线路开关的状态来变换网络结构。任何一个配电网,理论上均存在一个最优结构,在这个最优结构下运行,各负荷点的负荷协调优于其它方案。配电网网络重构的目的就在于此。

目前,配电网网络重构的算法较多,大致可归为2类:一类为以传统的优化技术为基础的各种优化算法,如图算法^[2],均衡视在精确矩法^[3]等;该类算法速度快,方法简单明确,具有实用化的应用潜力,但其解易陷于局部最优解^[2]。另一类为人工智能算法,如遗传算法^[4]、模糊遗传算法^[5]等,该类算法从理论上可以得到全局最优解,但其计算时间过长,在实用化方面面临考验。

以上这些算法所采用的配电网拓扑模型均是传统的电网模型,该模型主要体现基尔霍夫定律,而无法表示出配电网各顶点状态变化后的拓扑关系,以及各顶点间的路径关系。因此以上算法或者精度差或者计算

时间长,难以在实时系统中使用。文中提出了基于分层的拓扑模型负荷均衡算法,并采用最优化原理,将最优化原理与分拓扑模型相结合,实现配电网各源点的负荷均衡。

1 基于分层的配电网拓扑模型^[6]

1.1 配电网的分层模型

定义 配电网分层拓扑模型是求某一点对应的逐层顶点分布模型,该基点可以是源点、末梢点或所需要的某一点。

定义 分层拓扑辨识矩阵 $A_k = (a_{ij}^{(k)})_{v \times v}$

$$a_{ij}^{(k)} = \begin{cases} c_{ij}^{(k)} & c_{ij}^{(k)} = 1, i \neq j, k = 1, \dots, N-1 \\ 0 & c_{ij}^{(k)} \neq 1, i \neq j, k = 1, \dots, N-1(1) \\ 0 & i = j, k = 1, \dots, N-1 \end{cases}$$

定义 基点矩阵 $F_i = (f_{1j})_{1 \times v}$

由分层拓扑辨识矩阵就可以求出基点矩阵对应的分层模型为:

$$\begin{cases} \text{第1层} & y_{i1} = F_i = (f_{11} \ f_{12} \ \dots \ f_{1v}) \\ \text{第2层} & y_{i2} = F_i \cdot A = (f_{21} \ f_{22} \ \dots \ f_{2v}) \\ \vdots & \\ \text{第N层} & y_{iN} = F_i \cdot A_{N-1} = (f_{N1} \ f_{N2} \ \dots \ f_{Nv}) \end{cases} \quad (2)$$

• 收稿日期:2002-01-06

作者简介:林景栋(1966-),男,福建宁德人,重庆大学博士研究生,主要从事变电站综合自动化系统和配电网自动化系统、人工智能在电力系统中应用的研究。

1.2 配电网区域和分支的辨识

T 接点的度大于 2, 因此从邻接矩阵 $C(c_{ij})_{v \times v}$ 可以判断了 T 接点

$$\text{deg}(\sum_{j=1}^N c_{ij}) > 2 \quad \text{则顶点 } v_i \text{ 为 } T \text{ 接点} \quad (3)$$

定义 T 接点矩阵 $W = (w_i)_{1 \times N}$, v_i 为 T 接点, 则 $w_i = 1$, 否则 $w_i = 0$ 。

定义 分支是指从未梢点到区域顶点的一条支路。分支必然与区域有关, 利用以末梢点为基点的分层模型可以找到某一末梢点对应的分支包括哪些顶点, 属于哪一个区域。

定义 分支矩阵 $B_j = (b_i)_{1 \times v}$, 当 v_i 属于该分支时, $b_i = 1$, 否则 $b_i = 0$ 。

1.3 源点负荷算式

定义 负荷矩阵 $L = (l_{ij})_{v \times v}$, $l_{ij} (i \neq j)$ 是弧 c_{ij} 对应的负荷, 为已知条件, l_{ii} 为顶点的负荷, 除末梢点的匀荷已知为零外, 其余顶点负荷未知。

定义 顶点状态矩阵为 $T = (t_i)_{1 \times v}$, 顶点 v_i 合闸, 则 $t_i = 1$, 否则 $t_i = 0$ 。

区域负荷可由下式算出:

$$L_{B_j} = \sum_{i=2}^{m-1} \sum_{k=1}^v f_{ik} \cdot t_k \left\{ \sum_{n=1}^v f_{(i-1)n} \cdot c_{kn} \cdot l_{kn} \right\} \quad (5)$$

其中 m 为该分支从未梢点到 T 接点对应的层。

定义 区域分支负荷阵 $L_{BP} = (L_{BP_i})_{1 \times v}$;

$$L_{BP_i} = L_{B_i} + l_{P_i}$$

经过对区域分支负荷的预处理, 可以推导出各源点的负荷计算公式为:

$$L_{f_{j_i}} = f_{j_i} \cdot t_k \left\{ \sum_{k=1}^v f_{2k} \cdot [c_{jk} \cdot (1 - b_k)(1 - w_j - w_k) \cdot l_{jk} + c_{ik} \cdot w_k \cdot l_{BP_k}] + \sum_{m=2}^{N-1} \sum_{k=1}^v f_{mk} \cdot t_k \left\{ \sum_{i=1}^v f_{(m+1)i} [c_{ki} \cdot (1 - w_k - w_i) \cdot l_{ki} + c_{ki} \cdot w_i \cdot l_{BP_i}] \right\} \right\}$$

2 配电网负荷均衡的最优化算法

在配电网拓扑结构确定、各段弧负荷已知的前提下, 通过改变分段开关的位置, 将使各个源点的负荷发生变化。那么如何确定分段开关的位置, 既使各段弧均可以得到供电且无闭环运行现象, 又使各个源点的负荷最均衡。从配电网的负荷均衡的特点知道, 配电网的负荷均衡不能对其负荷进行任意组合, 而必须受制于

其负荷分布顺序。配电网负荷均衡的约束条件不仅减少负荷的组合数量, 而且指明了目标的搜索方向。

三源点配电网中必有一个区域与 3 个源点均相连, 但从约束条件知区域负荷只能属于一个源点, 那自然是源点分支中负荷最小的源点。将这一状态作为初始状态。确定了初始状态后, 如何确定搜索方向和目标函数值?

显然以后的优化过程就是从另 2 个源点分割出负荷组合到负荷最小的源点中来, 如图 1, 从 B_2 、 B_3 抽弧 f_{2i} 、 f_{3i} 组合到 B_1 。每一步组合一层, 在这一层组合时, 以此时负荷最均衡为目标函数, 逐层决策下去, 直到目标函数值不降反升时, 说明决策过程结束。这样在每一层时, 其目标函数值都是最小的, 而且其目标函数值是逐层降低的, 直到目标函数值最小, 此时即达到全局最小, 从而实现全局最优均衡

2.1 负荷均衡的数学模型

以三源点配电网为分析对象:

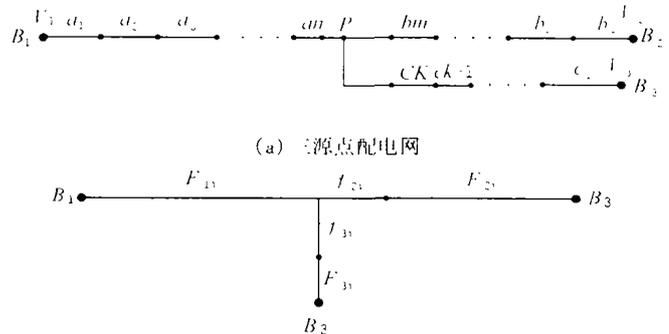


图 1 三源点配电网及其决策过程图

对于三源点的配电网 $D(V, E)$, 顶点数为 N , 不妨设 v_1, v_2, v_3 为 3 个源点, 邻接矩阵为 $C = (c_{ij})_{v \times v}$, 负荷矩阵 $L = (l_{ij})_{v \times v}$, 其中 $l_{ij} = l_{ji}$ 。因此对该配电网的负荷最优均衡问题可描述为:

$$\text{obj} \quad \min[\max(l_{11}, l_{22}, l_{33}) - \min(l_{11}, l_{22}, l_{33})] \quad (7)$$

$$\text{sub} \quad l_{11} + l_{22} + l_{33} = \sum_{i=1}^N l_{ij} \quad (i < j) \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N.$$

式(7)为目标函数, 最大源点负荷与最小源点负荷之差最小, 式(8)为约束函数, 确保所有弧均可以得到供电且无闭环现象。

2.2 配电网负荷均衡特点

配电网的供电只能从源点到末梢点, 因此配电网

的供电是有顺序的；对于配电网中的区域和分支，其负荷只能由一个源点来供电。所以负荷均衡不仅与负荷的大小有关，而且与负荷的分布顺序有关；同时要保证每一条弧有且只有一个源点与之对应。即配电网的负荷均衡有以下特点：

- 1) 配电网的源点负荷均衡不仅与各条弧的负荷大小有关，而且与各条弧的相互分布顺序有关；
- 2) 必须保证每一条弧有且只有一个源点与之对应；即分段开关的个数比源点的数量少一个；
- 3) 每一个源点的负荷必须受配电网运行的限制，即不能超过其最大允许值；
- 4) 每一个区域只能由一个源点供电，而不能将其负荷分割；
- 5) 每一个分支只能由一个源点供电，而不能将其负荷分割；
- 6) 每一个区域和其所属的大分支也只能由一个源点供电，而不能将其负荷分割。

2.3 优化的初始状态

对于三源点配电网，如图 1(a)，必含一个与三源点相联的区域，因此整个配电网可以分成 3 个源点分支负荷和一个区域负荷，显然为了负荷均衡，负荷区域应归到最小的源点分支负荷中去，这样就可以得到初始状态。

$$\begin{cases} B_1 \text{ 分支负荷分布: } (a_1 & a_2 & \cdots & a_n) \\ B_2 \text{ 分支负荷分布: } (b_1 & b_2 & \cdots & b_m) \\ B_3 \text{ 分支负荷分布: } (c_1 & c_2 & \cdots & c_i) \\ \text{区域负荷: } P \end{cases} \quad (9)$$

不妨设源点 v_1 负荷最小，则区域负荷应归源点 v_1 。所以优化的初始值为：

$$l_{110} = \sum_{i=1}^n a_i + p \quad l_{220} = \sum_{i=1}^m b_i \quad l_{330} = \sum_{i=1}^k c_i \quad (10)$$

2.4 分阶段优化策略

在优化的初始状态确定之后，以后的优化过程是从 B_2, B_3 分支中按分层顺序依次抽弧组合到 B_1 分支。是抽 B_2 的还是 B_3 的还是两者的，显然抽弧的顺序将决定能否实现最优解。由于配电网的各段弧的顺序是确定的，抽弧只能从属于 B_2, B_3 分支的最后一段弧抽。因此， B_2, B_3 分支的源点负荷是逐渐减小的，为了确保达到全局最优，必须保证在优化过程尚未结束时， B_2, B_3 分支的源点负荷大于 B_1 分支的源点负荷。设第

i 次优化后， B_2, B_3 分支的最后一段弧负荷分别为 f_{2i}, f_{3i} ；其剩余负荷为 F_{2i}, F_{3i} ； B_1 分支源点负荷为 F_{1i} 。如图 1(b) 所示。则第 $i+1$ 次优化可以描述为：

$$\text{obj } \min[\max(l_{11(i+1)}, l_{22(i+1)}, l_{33(i+1)}) - \min(l_{11(i+1)}, l_{22(i+1)}, l_{33(i+1)})] \quad (11)$$

$$\text{sub } l_{11(i+1)} = l_{11i} + k_1 f_{2i} + k_2 f_{3i}$$

($k_1 = 0$ 或 $1, k_2 = 0$ 或 1) 若 $k_1 = 1$ 且 $k_2 = 1$ ，则必须

$$l_{22i} > \frac{l_{11i} + l_{33i}}{2}, \text{ 且 } l_{33i} > \frac{l_{11i} + l_{22i}}{2} \quad (12)$$

2.5 各阶段优化计算规则

在每一次进行负荷决策时，到底组合一条弧还是两条弧还是计算结束了？由于搜索方向是单向的，即 B_2, B_3 分支不能再组合负荷进来，因此其基本原则是在确保 B_2, B_3 分支的负荷不会过早地变成最小值的前提下，使每一步的决策目标最优。这些计算规则有：

1) 若 $F_{2i} - F_{1i} > 0$ 且 $F_{3i} - F_{1i} > 0$ 则此时计算方法如下：

① 若 $F_{2i} - F_{1i} \geq f_{3i}$ 且 $F_{3i} - F_{1i} \geq f_{2i}$ 时，表示 F_{1i} 既使组合上 f_{3i}, f_{2i} 之后，其值仍小于 F_{2i}, F_{3i} ，此时 f_{2i}, f_{3i} 均组合给 F_{1i} 。

若 $F_{2i} + f_{2i} > \frac{1}{2}(F_{1i} + F_{3i} + f_{3i})$ ，则 $k_1 = 1$ ；

若 $F_{3i} + f_{3i} > \frac{1}{2}(F_{1i} + F_{2i} + f_{2i})$ ，则 $k_2 = 1$ 。

② 若 $F_{2i} - F_{1i} < f_{3i}$ 且 $F_{3i} - F_{1i} < f_{2i}$ 时，表示 F_{2i} 时，表示 F_{1i} 任选 f_{3i}, f_{2i} 之一组合时， F_{1i} 必大于 F_{2i}, F_{3i} 之中一个，因此为确保最小源点负荷较大，应选 F_{2i}, F_{3i} 两个中数值较大一个对应的弧；

③ 若 $F_{2i} - F_{1i} < f_{3i}$ 且 $F_{3i} - F_{1i} \geq f_{2i}$ 时， B_3 分支源点负荷最大，此时若选择 f_{2i} 弧负荷，不仅最大源点负荷未降，而且最小源点负荷上升不大；而若选择 f_{3i} 弧负荷，则不仅最大源点负荷下降了，而且最小源点负荷上升幅度高于前者。因此此时应选弧 f_{3i} 组合到 F_{1i} ；

④ 若 $F_{2i} - F_{1i} \geq f_{3i}$ 且 $F_{3i} - F_{1i} < f_{2i}$ 时，应选 f_{2i} 弧负荷组合到 F_{1i} 。

2) 若 $F_{2i} - F_{1i} > 0$ 或 $F_{3i} - F_{1i} > 0$ ，则 $k_1 = 1$ 或 $k_2 = 1$ 。

3) 若 $F_{2i} < F_{1i}$ 且 $F_{3i} < F_{1i}$ ，则优化结束。

按以上多阶段优化策略进行优化，直到 F_{2i}, F_{3i}

均小于 F_{1i} , 则优化进程结束。此时各源点负荷的差值最小既实现负荷最优均衡。

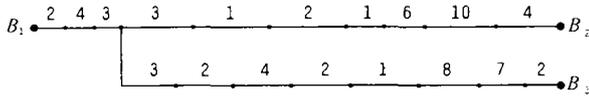


图2 具体的一个三源点配电网

3 算例

利用分层拓扑辨识模型, 可以求出各分支负荷分布模型:

分支的负荷分布: (2 4)

分支的负荷分布: (4 10 6 1 2 1)

分支的负荷分布: (2 7 8 1 2 4 2)

区域负荷: 9

其优化决策过程如下:

初始状态: $l_{110} = 15$ $l_{220} = 24$ $l_{330} = 26$

第一次决策后: $l_{111} = 18$ $l_{221} = 23$ $l_{331} = 24$

第二次决策后: $l_{112} = 22$ $l_{222} = 23$ $l_{332} = 20$

此时已达到全局最优。

4 结论

最优化原理与配电网分层拓扑模型的结合, 可将最优化问题分解成多阶段决策问题, 从而可以快速有效地实现配电网全局负荷均衡。为配电网网络重构实现最优提供了一条新的途径。

参考文献:

- [1] MERLIN A, BACK H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in Urban Power Distribution System[A]. Proc of 5th Power Systems Comp Con Cambridge[C]. UK, 1975, 2-6.
- [2] 刘健, 程红丽. 电网的模型化方法[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(10): 10-13.
- [3] 蔡中勤, 郭志忠. 配电网重构的均衡视在精确矩法[J]. 继电器, 2000, 28(12): 8-12.
- [4] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.
- [5] 余贻鑫, 段刚. 基于最短路计算方法和遗传算法的配电网网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 44-49.
- [6] 林景栋, 曹长修, 张邦礼. 基于分层模型的配电网拓扑辨识[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, 25(2): 51-54.

Loads Equalization Based on Optimization Principle and the Hierarchical Model for Distribution Networks

LIN Jing-dong, CAO Chang-xiu, ZHANG Bang-li

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing, 400044, China)

Abstract: Loss reduction is important for distribution networks and it is available to reduce loss by loads equalization. With increasing numbers of vertexes in distribution networks, compounding of loads are rapid increasing. It is hard to achieve the global optimization for load balancing by traditional model of distribution networks. Base on analyzing character of loads equalization for distribution networks, this paper provides a new method which conjugate the optimization principle and the hierarchical model of the distribution networks, can transfer the optimization issues into multi-stage decision-making problems, and can also achieve the optimization equalization of the distribution networks loads.

Key words: dynamic programming; loads equalization; hierarchical model; reconfiguration

(责任编辑 吕赛英)