主动配电网重构中一种最优潮流计算方法研究

分布式发电的波动将影响配电网重构方案的制定；配电网重构方案的拓扑结构会引起网损的变化，网损是影响购电计划优劣的重要指标。本研究考虑购电成本与网损的双重最优的解决方案。应用两层规划理论：第一层规划，以购电费最小为目标建立最优潮流模型，用内点法解这个模型，求得购电策略，将节点功率传递给第二层规划；第二层规划，以网损最小为目标建立配电网重构模型，用遗传算法求解这个模型，得到网络拓扑，将这个网络拓扑传递给第一层规划模型，再次得到购电策略，经过多次迭代求解，满足准确度要求，得到的购电方案和网络拓扑结构，使经济性最好的。最后用算例验证所提方法的有效性。

孙智[1] 马雪峰[2]/1. 中海智联（北京）科技有限公司 2. 北京电力经济技术研究院

孙智/工程师

关键词/Keywords

主动配电网 · 配网重构 · 二层规划 ·

0 前言

主动配电网技术能够解决电网应用大规模间歇式可再生能源，提高绿色能源利用率，优化一次能源结构等问题。主动配电网是具备组合控制各种分布式能源（DG）、可控负荷、储能和需求侧管理等能力的配电网络。其目的是加大配电网对于可再生能源的接纳能力，提升配电网资产的利用率，延缓配电网的升级投资，以及提高用户的用电质量和供电可靠性。

可再生能源、清洁化石能源以分布式发电的形式，在主动配电网中越来越多。配电网安排发电计划要充分考虑DG的购电与主电网的购电比例，使总的购电费用最少。同时主动配电网的测量、控制、信息传输，为配电网重构提供了条件。配电网重构也是主动配电网经济运行的一个内容。因此综合考虑主动配电网中的DG购电费用和网损最小，将两个指标联合优化，得到最佳方案。

主动配电网中，有大量的分布式电源：燃气轮机、光伏发电和风力发电等。配电网安排发电计划，基于当前的网络结构下，功率平衡约束，支路过载约束等。以购电费最小为目标，合理安排主网购电和分布式电源购电份额。配电网重构是为了寻求网损最小的拓扑结构。两者都是为了经济指标最优，两者之间是互相影响的。近几年，由于DG的增加，开始有人研究考虑包含DG的配网重构。在配电网重构中对DG的处理分三种情况：

1）对DG的处理局限于将DG作为“负”的负荷[1-2]，这样处理体现不出DG的运行优势。

2）优化DG的出力，仅仅是为了配电网重构中网损最小[3-5]，没有考虑发电费用。

3）考虑风电等可再生能源的波动特性，建立随机潮流模型，建立以网损期望值最小的重构模型[6]。

4）将发电费用最小作为目标函数[7]，优化电容器投切和网络拓扑，没有考虑网损变化。考虑分布式发电的最优潮流购电策略。

上述研究可见：以购电费用最小为目标，建立最优潮流模型，然后求解模型，得到最佳购电策略，但没有考虑网络结构对网损的影响。考虑分布式发电的配电网重构，将分布式发电作为“负”的负荷，以网损最小为目标建立配电网重构模型，用粒子群方法、遗传算法等方法求解这个模型，得到网损最

中国知网 https://www.cnki.net

小的网络拓扑结构，但是没有与购电策略联合优化。

上述研究没有全面考虑有分布式发电的购电费用与网损的联合优化，因此得到的方案不是最佳方案。本文第一层规划，以购电费最小为目标建立最优潮流模型，求得到购电策略，将节点功率传递给第二层规划；第二层规划，以网损最小为目标建立配电网重构模型，得到网络拓扑，将这个网络拓扑传递给第一层规划模型，再次得到购电策略，经过多次迭代求解，得到综合购电方案和网络拓扑结构的最经济的方案。

1 第一层规划模型

（1）最优潮流目标函数

在主动配电网中制定发电计划，调用分布式电源和从主网购电，发电费用表达式如下为

$$\min f_1 = C_{sysv} P_{sys} + \sum_{i=1}^{n} C_{DGvi} P_{DGi} \tag{1}$$

式中，f_1为发电费用；C_{sysv}为单时段从电网买电的电价；P_{sys}为单时段从电网购买有功功率；n为配电网节点数；C_{DGvi}为在i节点上DG的电价；P_{DGi}为在i节点上DG的发电功率。

（2）约束条件

潮流方程约束为

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^{n} U_j \left(G_{ij}\cos\delta_{ij} + B_{ij}\sin\delta_{ij}\right) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^{n} U_j \left(G_{ij}\sin\delta_{ij} - B_{ij}\cos\delta_{ij}\right) \end{cases} \tag{2}$$

式中，P_i、Q_i分别为节点i注入有功功率、无功功率；U_i、U_j分别为节点i、j的电压；G_{ij} 、B_{ij} 和 δ_{ij} 分别为节点 i、j的电导、电纳和相角差。

2）电压约束为

$$U_{i\min} \leqslant U_i \leqslant U_{i\max} \tag{3}$$

式中，$U_{i\max}$、$U_{i\min}$分别为节点 电压有效值的上、下限。

支路功率约束为

$$S_j \leqslant S_{j\max} \tag{4}$$

式中，S_j为第j条支路上实际流过功率；$S_{j\max}$为第j条支路上允许的传输功率最大值。

从主网买电约束为

$$P_{sys} \leqslant P_{sys\max} \tag{5}$$

式中，P_{sys} 为单时段从主网买的实际有功功率；$P_{sys\max}$为单时段从主网买的最大有功功率。

DG发电功率约束为

$$P_{DGi} \leqslant P_{DGi\max} \tag{6}$$

式中，P_{DGi}为单时段在i节点上的DG实际发出的功率；$P_{DGi\max}$为在i节点上的DG额定装机容量。

2 第二层规划模型

（1）配电网重构的目标函数

配电网重构的目标有许多，这里以网损最小为目标，表达式为

$$\min f_2 = \sum_{j=1}^{b} k_j r_j \frac{P_{lj}^2 + Q_{lj}^2}{U_j^2} \tag{7}$$

式中，f_2为网损，通过潮流计算求得；b为支路数；k_j为开关j的状态变量，是0～1离散量，0代表打开，1代表闭合；r_j为支路j的电阻；P_{lj}、Q_{lj}为支路j末端流过的有功功率和无功功率；U_j为支路j末端的节点电压。

（2）配电网重构的约束条件

潮流方程约束为为

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^{n} U_j \left(G_{ij}\cos\delta_{ij} + B_{ij}\sin\delta_{ij}\right) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^{n} U_j \left(G_{ij}\sin\delta_{ij} - B_{ij}\cos\delta_{ij}\right) \end{cases} \tag{8}$$

式中，P_i、Q_i分别为节点 注入有功功率、无功功率；U_i、 U_j分别为节点i、j的电压；G_{ij}、B_{ij}和 δ_{ij}为分别为节点i、j的电导、电纳和相角差。

电压约束为

$$U_{i\min} \leqslant U_i \leqslant U_{i\max} \tag{9}$$

式中，$U_{i\max}$、$U_{i\min}$分别为节点i电压有效值的上、下限。

支路功率约束为

$$S_j \leqslant S_{j\max} \tag{10}$$

式中，S_j为第j条支路上实际流过视在功率；$S_{j\max}$为第j条支路上允许的传输视在功率最大值。

（3）网络拓扑约束

重构后的配电网络呈辐射型，没有环网。网络保持连通性，不存在孤岛和孤点。

图1为双层规划图。第一层通过最优潮流，

中国知网 https://www.cnki.net

得到分布式电源功率和主网功率。将这两个变量传递到第二层规划，用遗传算法求配电网重构，得到最少网损下的配电网拓扑结构。在该结构下，网损发生变比，引起主网供应功率的变化，原来的购电计划不再是最佳的。该结构可能引发原来的购电计划在一些支路上过载，因此要重新进行最优潮流计算，将第二层计算结果网络拓扑结构传递到第一层。

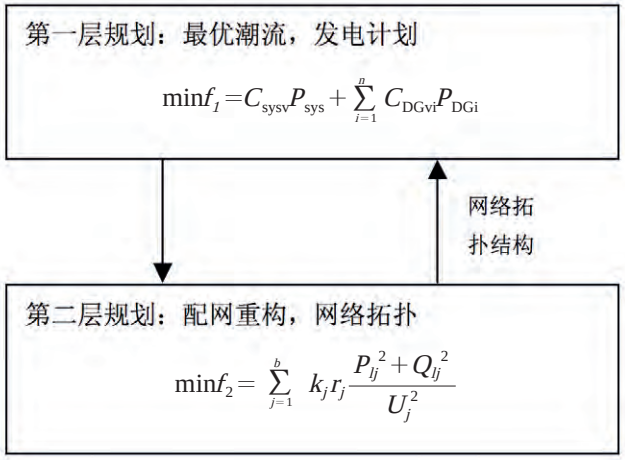

图1 双层规划图

3 求解流程

（1）已知条件

最优潮流需要的已知数据包括：

1）节点类。节点类型（负荷节点、发电机节点和DG节点），注入功率（有功功率、无功功率）。

2）支路类。是末端节点号、支路类型（变压器、线路）阻抗、导纳和电压比。

3）经济类。主网发电成本曲线、DG发电成本曲线。

4）约束条件。功率平衡约束、节点电压约束、支路功率约和电源功率约束。

5）计算控制变量。迭代计算的准确度、迭代次数、遗传算法中的种群数、遗传迭代次数、交叉和变异概率等。

（2）最优潮流计算

在当前拓扑结构下，用内点法进行潮流计算，满足功率平衡约束、节点电压约束、支路功率约和电源功率约束，求得主网购电功率、DG购电功率，得到节点注入功率。

（3）配电网重构

基于第二步节点注入功率，用遗传算法进行配电网重构，满足功率平衡约束、节点电压约束和支路功率约，得到网损最小的网络拓扑方案。

（4）判断

计算购电费与网损费之和，两次迭代计算，小于准确度要求，则停止；否则回到第二步继续进行迭代。基于最优潮流的主动配网重构的求解流程图如图2所示。

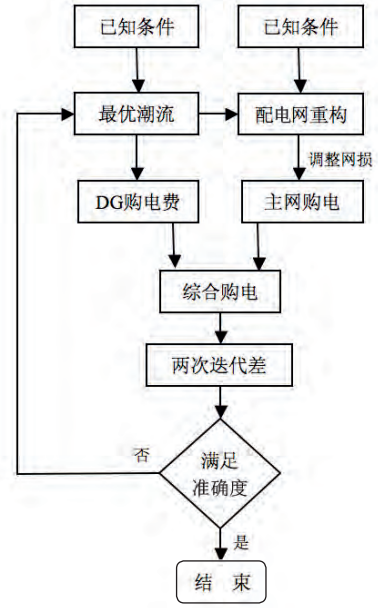

图2 基于最优潮流的主动配网重构的求解流程图

4 算例分析

图3是具有3条馈线的配电网络，系统基准容量为100 MV·A，基准电压为23 kV，整个网络总负荷为28.7＋j5.9 MV·A 。支路数据如表1所示，阻抗用标幺值。母线数据如优化运行结果如表4所示。表2所示，节点注入有功功率和无功功率是有名值。电源已知数据如表3所示。

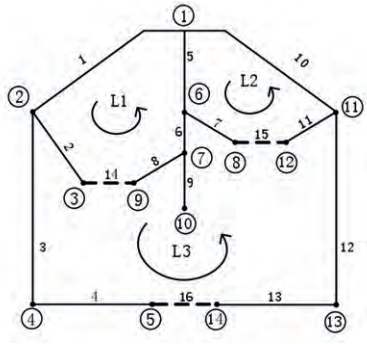

图3 IEEE3馈线系统

中国知网 https://www.cnki.net

表1 支路参数

支路编号	始端节点	终端节点	R（p.u.）	X（p.u.）	支路编号	始端节点	终端节点	R（p.u.）	X（p.u.）
1	1	2	0.075	0.1	9	7	10	0.08	0.11
2	2	3	0.08	0.11	10	1	11	0.11	0.11
3	2	4	0.09	0.18	11	11	12	0.09	0.12
4	4	5	0.04	0.04	12	11	13	0.08	0.11
5	1	6	0.11	0.11	13	13	14	0.04	0.04
6	6	7	0.08	0.11	14	3	9	0.04	0.04
7	6	8	0.11	0.11	15	8	12	0.04	0.04
8	7	9	0.11	0.11	16	5	14	0.09	0.12

表2 节点功率

节点编号	P／MW	Q／Mvar	节点编号	P／MW	Q／Mvar
1	0	0	8	1.0	0.9
2	2.0	1.6	9	0.6	－0.5
3	3	0.4	10	4.5	－1.7
4	2	－0.4	11	1	0.9
5	1.5	1.2	12	1.0	－1.1
6	4	2.7	13	1.0	0.9
7	5	1.8	14	2.1	－0.8

表3 电源已知数据

节点	类型	有功功率		变动成本
		下限/MW	上限/MW	元/MW·h
1	主网	－	28	584
4	燃气轮机	0	2	810
13	内燃机	0	2	710

方案1：网络不重构，开断的线路号是14,15,16，此时调用4,13节点DG。

方案2：调用4,13节点的DG，并进行网络重构。

表4 不计线路功率约束优化运行结果

方案	开断的线路号	网损/MW	总费用/万元
方案1	14,15,16	0.4111	1.983
方案2	8,7,16	0.395	1.982

方案1只进行最优潮流计算，不考虑配电网重构，总费用1.983万元，而方案2计及了最优潮流的配电网重构，总费用是1.982万元，费用减少了。虽然减少量比较小，由于计算的是瞬间的费用，如果经年累月，费用也很可观。

5 结束语

本文提出了基于最优潮流的主动配电网重构方法，应用二层规划理论求解。减少了电网购电费用，提高了系统运行的经济性。如果该方法与无功设备的投切配合，将取得更好的电能质量和经济效益。

参考文献

[1] 王秀丽，吴宏晓，别朝红，等．以提高系统可靠性为目标的配电网络重构[J]．中国电力，2001，34(9)：40-43.

[2] 王佳佳，吕林，刘俊勇，等. 基于改进分层前推回代法的含分布发电单元的配电网重构[J]. 电网技术，2010，34(9)：60-64.

[3] 崔金兰，刘天琪，李兴源．含有分布式发电的配电网重构研究[J]．电力系统保护与控制，2008，36(15)：37-40，49.

[4] Rugthaicharoencheep N，Sirisumrannukul S. Feeder reconfiguration with dispatchable distributed generators in distribution system by tabu search[C]. Universities Power Engineering Conference (UPEC)，Proceedings of the 44th International，2009：1-5.

[5] Mojdehi M N，Kazemi A，Barati M. Network operation and reconfiguration to maximize social welfare with distributed generations[J]. EUROCON， IEEE，2009：552-557.

[6] Rugthaicharoencheep N，Sirisumrannukul S. Optimal feeder reconfiguration with distributed generators in distribution system by fuzzy multiobjective and Tabu search[C]. Sustainable Power Generation and Supply，SUPERGEN'09，International Conference on，2009：1-7.

[7] 陈光，戴攀，周浩，等. 计及入网电动汽车和分布式电源的配电系统重构[J]. 电网技术，2013年，37(1)：82-88

（收稿日期：2015－05－26）EA

作者简介

孙智（1971-），男，工程师。从事电网规划运行互动领域的数据处理研究。

中国知网 https://www.cnki.net