

考虑经济性与可靠性的煤层气微电网运行优化技术研究

配电网网架结构优化规划是在已确定配电网中变电站的布点及其用电负荷的情况下,求解配电线路的拓扑结构和线型,使网络在保证供电质量的前提下,线路投资建设费用最小。某煤层气微电网的线路结构已基本确定,增减线路难度较大,不符合实际,所以只在现有网架结构的基础上进行运行方式的优化,降低网络损耗和提高可靠性。在潮流分析基础上,以系统网损成本和系统停电损失费用为综合优化目标函数,以配电网潮流方程为等式约束,以网络连通性、辐射性、线路传输功率限制和电压限制为不等式约束,建立煤层气微电网配电网运行优化模型。利用电力系统动态模拟软件的开关优化功能对模型进行优化,给出优化方案,并对优化前后网损和可靠性作对比分析,证明优化方案的有效性。

李 岩 康忠健/中国石油大学(华东)电气工程系

0 引言

在当前全球能源日益紧缺的背景下,作为大电网的有效补充和分布式能源的有效利用形式,微电网已引起世界各国的广泛关注和重视,微电网的发展可以提高系统运行的效率,降低发电成本,节能减排等^[1]。由于微电网采用了先进的现代电力技术,能够独立可控运行,减少了供电区域对大电网的依赖性,在主电网受到大的故障甚至崩溃时,供电范围内的重要负载仍然能够连续供电,这对保证生产稳定、人民生活和国家安全有很大的战略意义^[2]。

煤层气田非常规资源勘探开发是中国石化上游板块新建产能的重要战略举

措。该工程具有起点高、技术含量高、开发投入大、地形地貌复杂、生产环境差和施工难度大等特点,对供配电系统安全可靠要求极高。研究开发煤层气田微电网运行优化技术,对提高煤层气田微电网的稳定性和可靠性,降低网络损耗有非常重要的意义。

文献[3]分析配电网分段开关配置的技术特点,将初选出可能安装分段开关的线段作为控制变量,提出应用小生境遗传算法来优化开关位置和数量,找出对应不同开关数量的全部极值点,从中选出满足可靠性要求的全局最优解。文献[4]根据配电线路结构结合线路故障或检修运行效益和设备综合投资成本,建立分支开关配置的目标函数;然后针对该目标函数,采用遗传算法求解配电线路故障或检修运行效益和设备综合投资成本的综合效益最大化的分支开关簇。文献[5]提出了一种中压配电网环网开关优化配置的方法,在保证系统及用户供电可靠性的前提下,使得综合费用最低。文献[6]将优化结果作为待选方案,将供电可靠性大于允许下限的待选方案中,开关数量最少的规划方案作为最优方案,达到投资净效益最大的实际效果。在提高配电网可靠性的技术措施中,对馈线进行分段,通过开关操作隔离故障减少停电损失是比较可行而且效益非常明显的一种方法^[7]。馈线上增加开关配置,能够提高配电网可靠性水平,但开关数量增加的同时,却增加了网络的建设和维护成本,也增加了馈线自动



李 岩/硕士研究生

关键词/Keywords

煤层气微电网·
运行优化·
网损·
可靠性指标·

教育部中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(14CX05039A),国家自然科学基金资助项目(61271001)。

化实施的难度。开关优化配置模型属非线性、不可微的约束组合优化问题^[8]。本文从开关投资与可靠性效益出发,建立分段开关优化配置模型,并采用开关优化功能对模型进行求解,寻求馈线上最优的分段开关配置方案。

1 煤层气微电网运行优化模型建立

1.1 可靠性指标

随着国民经济的发展和人民生活水平的提高,高科技产业数量的增加,用户对电网的供电能力和供电可靠性的要求越来越高^[9]。

可靠性价值一般通过系统的停电损失来表示,它与负荷节点的可靠性指标有关。系统的停电损失是用户停电频率、用户停电持续时间的函数。停电事件由系统元件故障引起,因此,用户停电频率与元件的故障率有关,而用户停电时间则由元件的故障率和故障时间决定。对于一个负荷点 i ,其可靠性指标的计算实际上是考虑从电源点到负荷点的一个串联系统。因此,负荷点 i 的可靠性指标可以通过下面的公式来计算^[10]。

故障率计算公式为

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^m \lambda_j \quad (1)$$

故障时间计算公式为

$$r_i = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j r_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j} \quad (2)$$

式中, λ_j 和 r_j 为元件 j 的故障率和故障时间; m 为由电源到负荷点 i 的所有元件数。

需要说明的是,以上公式基于以下假设条件:

- 1) 各元件的故障为独立事件。
- 2) 仅考虑一阶故障事件。
- 3) 不考虑保护系统动作的影响,假设其自动化水平很高,其动作时间较之元件的故障时间可以忽略不计。

当某一元件发生故障时,该元件前面的负荷点可与故障元件隔离,因此仍然可由电源供电。

而该元件后面的负荷点全部停电,停电时间等于元件的故障修复时间。因此,负荷点 i 每年的停电损失可以表示为

$$IC_i = EENS_i CIC_i \quad (3)$$

式中, CIC_i 为负荷点 i 单位电量的停电损失,元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$; $EENS_i$ 为节点 i 的电量不足期望,通过可靠性计算得到, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{y}$ 。

设负荷点 i 的平均负荷为 L_i ^[11],则计算公式为

$$EENS_i = \sum_{j \in m(i)} \lambda_j r_j L_i \quad (4)$$

系统总的停电损失费用 C_M 可表示为

$$C_M = \sum_{i=1}^n EENS_i CIC_i \quad (5)$$

式中, n 为负荷节点数。

1.2 数学模型

在现有配电网结构的基础上进行运行优化,确定分段开关位置。配电网开关优化就是确定馈线上断路器、隔离开关、负荷开关、分支线上熔断器以及切换开关等的最佳位置和数量,以提高系统可靠性,减少停电损失,提高资金的使用效率。

配电网中,如果忽略开关故障,就提高供电可靠性而言,断路器、隔离开关和切换开关越多,每段上用户就越少,则每次故障或计划维修造成停电影响的用户数就越少,可靠性也就越高;但从经济性上考虑,设备越多,其投资也越大,这样不一定能获得最大的经济效益。由此可见,可靠性与经济性之间存在一个最佳的平衡点,因此,这就需要通过技术经济分析,确定每回线路的最优开关设备配置,以达到可靠性和经济性的相互协调^[12]。开关优化配置的数学模型为

$$\min (C = C_M + C_L) \quad (6)$$

式中, C_M 为系统停电损失费用; C_L 为系统网损费用。

1.3 约束条件

根据电力系统要求与配电网实际运行特点,配电网应满足以下约束条件。

(1) 网络连通性^[13]

要求每一个负荷点都必须与配电网相连,

由电源点供电。

(2) 网络辐射性

配电网应开环运行，每个负荷点只能由一个电源供电。

(3) 功率平衡

$$\sum_i^N P_i = \sum_j^M P_j, \quad \sum_i^N Q_i = \sum_j^M Q_j \quad (7)$$

式中， N 为节点总数； M 为线路总数； P_i 为节点有功负荷； P_j 为支路有功功率； Q_i 为节点无功负荷； Q_j 为支路无功功率。

该约束表明线路中的有功功率与无功功率应满足负荷节点的有功功率与无功功率需求。

(4) 潮流约束

各线路潮流必须在线路容量范围以内，即

$$P_j \leq P_{j\max} \quad j \in D \quad (8)$$

式中， P_j 为线路 j 上的潮流； $P_{j\max}$ 为线路 j 的潮流限值。

(5) 电压降约束

各节点的运行电压必须在正常电压上下限范围即

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad i \in N \quad (9)$$

式中， $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 和 U_i 分别为节点 i 的电压上下限和运行电压； N 为节点数。

2 优化求解方法

运行优化中既有组合优化问题，又有参数优化问题，是遗传算法在电力系统中应用的一个主要领域。由于遗传算法可以处理非线性因素且有较大的概率求得全局最优解，所以可以解决开关优化问题。

遗传算法 (Genetic Algorithm) 是一类借鉴生物界的进化规律 (适者生存，优胜劣汰遗传机制) 演化而来的随机化搜索方法。它由美国的 J. Holland 教授 1975 年首先提出。对于一个最优化问题，一定数量的候选解 (称为个体) 的抽象表示 (称为染色体) 的种群向更好的解进化。解一般用二进制表示 (即 0 和 1 的串)。进化从完全随机个体的种群开始，之后一代一代发生。在每一代中，整个种群的适应度被评价，从当前种群中选择多个个体 (基于它们的适应度)，通过自然

选择和突变产生新的生命种群，该种群在算法的下一代迭代中成为当前种群。

遗传算法的基本过程如图 1 所示。

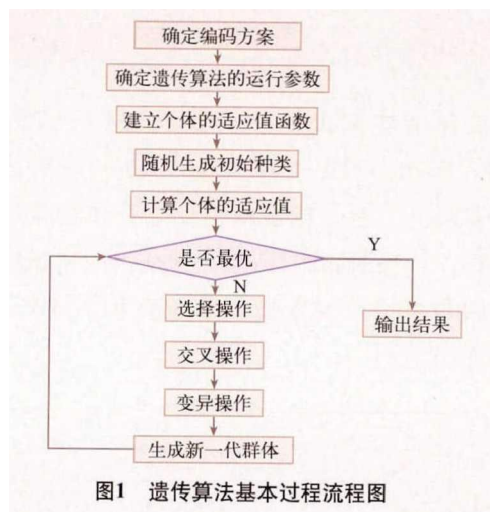


图1 遗传算法基本过程流程图

3 算例仿真分析

3.1 开关优化

根据现场收集的参数，在电力系统动态模拟软件中对煤层气田微电网进行建模仿真。

外部电源、变压器模型均采用电磁暂态模型，线路采用 PI 型集中参数等值，设备参数以实际设备铭牌数据录入；游梁式抽油机电动机和高压压缩机等各类负荷采用能反映现场实际典型负荷曲线的电磁暂态模型。

在所建立的煤层气微电网数学模型基础上，采用牛顿-拉夫逊算法对煤层气微电网进行潮流分析与计算。经仿真计算知，煤层气田微电网中的总负荷平均值约为 939.28 kW，所有发电机运行的总有功功率为 989~1 060 kW，则网络损耗范围为 49.72~120.72 kW，网络平均损耗率为 8.208%。

在进行开关优化前，先根据现有真空断路器的位置定义馈线。配置开关优化功能命令，选择目标函数为同时优化经济性指标和可靠性指标，即最小化网损和停电损失。网损价格设置为电价 0.083 \$/kW·h，根据负荷单位缺电成本 45 万每天、总有功 0.939 28 MW，将电量不足期望值设置为 3.327 \$/kW·h，电压降约束设置为 ±5%。优化结果如表 1 所示。

表1 开关优化结果

类别	网损/MW	负荷/MW	最大电压下降(%)	最大电压上升(%)	电压最大值(pu)
优化前	0.040 728	0.525 790	2.190 454	0.902 301	1.000 023
优化后	0.033 016	0.355 590	2.190 560	1.109 690	1.002 201
变化量(%)	-18.934 547	-32.370 333	0.004 807	22.984 365	0.217 874

优化后实际网络拓扑结构W77-T55T，T22T-W70，PT4-W8，延6-10-1-W19处的断路器断开，整个微电网由发电机和电源分片供电运行，示意图如图2所示。馈线上网络损耗由优化前的0.040 728 MW减小为0.033 016 MW，降低了接近20%。

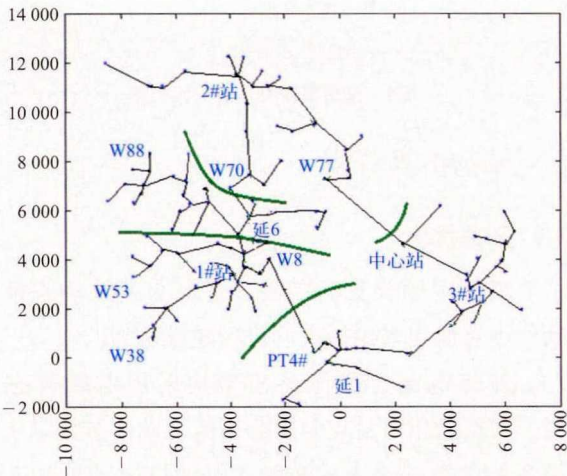


图2 开关优化结果示意图

由潮流计算报告可知，优化后微电网中除去发电机延6-1和与之相连的T64端电压为0.965(pu)之外，其余各节点的电压大多分布在0.985~1.021(pu)之间，与优化前相比电压质量提升。

3.2 可靠性分析

在开始可靠性分析计算前，需要根据具体的可靠性数据模型设置网络模型。以线路为例，选择线路类型-可靠性标签-概率性模型，输入持续故障频率，平均修复时间，暂态故障频率等参数，不同线路类型或线路电压等级参数值不同。母线、变压器的设置类似。根据现有真空断路器的位置定义馈线，利用电能费用定义负荷成本曲线。

在上述准备工作之后，开始可靠性分析计算。选择考虑约束条件的潮流分析方法，计算时间为整年，网络为配电网，费用选择之前设置的

负荷成本曲线，约束条件考虑全部元件的容量约束和电压上下限约束。

分别对开关优化前后的网络结构进行可靠性分析计算，得到的结果如表2所示。

表2 优化前后可靠性分析结果对比

可靠性指标 ^[14]	优化前	优化后
平均系统停电频率 (ASIFI) /(1/a)	0.135 281	0.056 817
平均系统停电持续时间 (ASIDI) /(h/a)	0.332 112	0.173 053
平均电量不足 (AENS) /[MW·h/(C·a)]	0.002	0.001
平均供电可靠性 (ASAI)	0.999 957 718 1	0.999 981 855 8
平均供电不可靠性 (ASUI)	0.000 042 281 9	0.000 018 144 2

注：AENS单位MW·h/(C·a)中的C表示用户。

由表2可以看出，优化后系统停电频率降低，停电持续时间缩短，电量不足值减小，供电可靠性提高大约57%。

4 结束语

本文在电力系统分析软件内建立某煤层气田微电网仿真模型，所建数学模型与实际相符，模型仿真计算准确度大于90%。利用该仿真模型对煤层气微电网10 kV配电网架构进行运行优化分析，目标函数为同时优化经济性指标和可靠性指标，优化后的系统网损降低约20%，供电可靠性提高约57%，系统更加经济、可靠地运行，证明优化方案的有效性。

参考文献

[1] 王辉. 微电网经济运行优化 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
[2] 罗建中. 分布式微型电网并网研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.

- [3] 王艳松, 陈国明, 张加胜, 等. 基于小生境遗传算法的配电网开关优化配置 [J]. 电工技术学报, 2006, 21 (5): 82-86.
- [4] 梅明伟, 张全起. 基于遗传算法的配电线路分支开关优化配置 [J]. 山东电力技术, 2014 (1): 54-56.
- [5] 史燕琨, 王东, 孙辉, 等. 基于综合费用最低的配电网开关优化配置研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (9): 136-141.
- [6] 杨文字, 刘健, 余健明, 等. 配电网分段和联络开关的优化规划 [J]. 中国电力, 2004, 37 (2): 50-54.
- [7] 解飞. 油田配电网变电站规划与馈线分段研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2008.
- [8] 谢开贵, 刘柏私, 赵渊, 等. 配电网开关优化配置的动态规划算法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (11): 29-34.
- [9] 韩辉. 基于可靠性评估的电网规划研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [10] 梁朔. 基于可靠性与经济性的配电网开关优化研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [11] 贺艳辉. 配电网可靠性与经济性分析 [D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [12] 王峻峰. 配电网可靠性评估及开关优化配置研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [13] 麻秀范. 含分布式电源的配电网规划与优化运行研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [14] 解翔, 袁越, 李振杰. 含微电网的新型配电网供电可靠性分析 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (9): 67-72.

(收稿日期: 2017-05-21) EA

(上接第47页)

将单节电池接入蓄电池组进行充电。活化后的蓄电池仍然电压低, 就需要更换蓄电池^[11]。蓄电池核对性充放电每次可以进行2~3次, 直到蓄电池组充放电合格。另外, 新安装蓄电池应每两年做一次核对性充放电, 四年后每年做一次核对性充放电, 以检查蓄电池合格。

4 结束语

两电三充直流系统虽然运行可靠, 但要做到万无一失安全稳定, 需正确监视直流系统电压、电流, 能够灵活正确调整直流系统电压, 熟练充电机日常维护, 熟练直流系统运行方式正确倒换操作, 熟练蓄电池日常运行维护, 正确进行蓄电池核对性充放电、活化试验。如此, 可以正常操作直流系统, 可以应对直流系统任何事故异常, 保障变电站直流系统可靠稳定运行。

参考文献

- [1] 黄晓明, 杨涛, 史清芳. 变电站直流系统可靠性研究 [J]. 供用电, 2016 (9): 52-55.
- [2] 胡广超. 变电站蓄电池组远程核对性充放电的研究与应用 [J]. 电气技术, 2013 (10): 79-81.
- [3] 黄媛, 吕林, 陈井锐, 等. 电网变电站直流系统蓄电池模型 [J]. 四川电力技术, 2011, 34 (6): 67-70.
- [4] 李露露, 雍静, 梁仕斌, 等. 民用低压直流供电系统保护综述 [J]. 电工技术学报, 2015 (22): 133-143.
- [5] 李林芝, 王小飞. 直流感地对继电保护装置的影响分析 [J]. 硅谷期刊, 2013 (7).
- [6] 张勋, 李刚. 变电站直流系统绝缘检测方法研究 [J]. 电气技术, 2016, 17 (10): 69-73.
- [7] 张全元. 变电运行现场技术问答 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [8] 魏林, 邓文尧. 直流电源系统中电压调整方法 [J]. 电工技术, 2014 (11): 65.
- [9] 钟新波, 顾洪波. 蓄电池充电技术问题解答 [J]. 农机使用与维修, 2012 (2).
- [10] 张清华, 张志军. 电力变电站蓄电池远程充放电维护管理系统 [J]. 电力信息与通信技术, 2017 (1): 46-50.
- [11] 周军, 朱博楠, 杨圣强, 等. 基于动态差值法的直流系统绝缘监测技术 [J]. 电工技术学报, 2015 (1): 235-241.

(收稿日期: 2017-02-28) EA