

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.11.021

计及电动汽车充电站的配电网综合优化研究

李 梁¹, 袁 军^{1*}, 高一凡², 甄浩庆³, 王建全²

(1. 国网浙江省电力公司 电动汽车服务分公司, 浙江 杭州 310007;

2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

3. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310012)

摘要:针对电动汽车充电站接入配电网优化运行这一问题,为达到降低配电网网损和提升网络节点电压质量的目标,在常规的配电网优化措施基础上就计及电动汽车充电站接入的配电网综合优化问题进行了研究。分析了网络重构、无功优化、电动汽车充电站注入功率三者之间的关系,提出了应用粒子群算法(PSO)对三者进行统一优化的方法。在 IEEE33 配电系统上进行了仿真试验。研究表明,综合优化下系统的网损最低、电压质量最佳,从而验证了该方法的有效性。

关键词:电动汽车充电站;无功优化;网络重构;粒子群算法

中图分类号:TM71

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)11-1420-05

Comprehensive optimization for distribution network with the electric vehicle charging station

LI Liang¹, YUAN Jun¹, GAO Yi-fan², ZHEN Hao-qing³, WANG Jian-quan²

(1. Zhejiang Electric Vehicle Company, State Grid, Hangzhou 310007, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Zhejiang Provincial Electric Power Design Institute, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Aiming at the problem that optimal operation of distribution network with the electric vehicle charging station, in order to achieve the objective of reducing the loss of the distribution network and improving the network voltage quality, based on common optimal measures, the comprehensive optimization for distribution network with the electric vehicle charging station was researched. After the analysis of the relations among reactive power optimization, network reconfiguration and power input of the electric vehicle charging station, a method to unified optimize the above three by using particle swarm optimization (PSO) algorithm was proposed. The IEEE33 system was tested. The results indicate that the network loss and voltage under the comprehensive optimization are the best, and the proposed algorithm is effective.

Key words: electric vehicle charging station; reactive power optimization; network reconfiguration; particle swarm optimization(PSO)

0 引 言

随着中国经济的快速增长,电力负荷急剧增加,石化能源枯竭与能源污染日益严重,发展电动汽车作为节能减排的重要措施被世界各国普遍接受和采纳。电动汽车的大规模接入将对配电网产生重大影响,电动

汽车充电站具有储能作用,可以作为等效分布式微电源参与电网的调度来提高配网设备的利用率。电动汽车充电站接入配电网会使配电网络由单电源、辐射型结构逐步变为遍布电源和负荷的复杂网络^[1],传统的配网规划、运行、保护都面临重大的变化。配网重构和无功优化是配电网优化运行的两个重要手段,已有的

收稿日期:2014-07-08

作者简介:李 梁(1981-),男,山东沾化人,经济师,主要从事电力经济方面的研究. E-mail:liliang@163.com

通信联系人:袁 军,MBA,工程师. E-mail:yuan_jun@zj.sgcc.com.cn

研究都是将两者分开考虑或是迭代进行^[2]。但实际上两者紧密联系并相互影响,因而有必要将两者统一考虑;与此同时,电动汽车充电站接入后,网络的功率流动和电压分布都会发生变化,这对网络重构和无功优化的结果都会产生影响。因此,研究计及电动汽车充电站的配电网综合优化有重要意义。

文献[3]以网损最小为目标,视分布式发电(DG)设备为可调度电源,将二进制粒子群算法和变邻域搜索算法相结合,对网络重构和 DG 输出功率同时优化,但未考虑无功优化的影响;文献[4]综合考虑了无功优化和网络重构,采用了两者交替迭代的方式,运用启发式算法求解,但易陷入局部最优;文献[5]提出了基于微分进化算法的配电网综合优化算法,网络重构与无功优化统一采用整数编码的方式,但未能考虑分布式发电接入后对系统的影响;文献[6]采用启发式算法介绍了 DG 接入后的配电网重构,研究了含 DG 的配电网网损分摊问题,但由于将 DG 视为恒定功率模型,未实现对 DG 输出功率的优化。

本研究考虑到电动汽车充电站的功率注入将对配电网的网络重构和无功优化结果产生影响,同时网络重构和无功优化也相互关联并相互影响,提出对电动汽车充电站注入功率、网络重构、电容器投切这三者进行统一编码、综合优化的思路,并对几种不同的优化方案进行比较分析,得出相应结论。

1 配电网综合优化的数学模型

1.1 目标函数

配电网综合优化的措施通常包括无功优化和网络重构,在有电动汽车充电站等可控分布式电源接入配电网的情况下,研究者还可以通过调节这些可调度电动汽车充电站的功率实现配网的优化运行^[7]。本研究以配电网网损最小作为优化目标,并将电压约束以罚函数的形式计入目标函数,具体数学表达式为:

$$\min F = P_{\text{loss}} + \lambda \sum_{i \in N} (\Delta V_i)^2 \quad (1)$$

式中: λ —节点电压越限罚值; P_{loss} —配电网网损; ΔV —节点电压超出其限制的越限量。具体计算公式如下:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^N V_i \sum_{j \in i} V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (2)$$

$$\Delta V_i = \begin{cases} V_i - V_{i,\max} & V_i > V_{i,\max} \\ V_{i,\min} - V_i & V_i < V_{i,\min} \\ 0 & V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $V_i, V_{i,\max}, V_{i,\min}$ —节点电压、电压上限及下限; N —网络节点集合; G_{ij} —导纳矩阵元素的实部; θ_{ij} —节

点 i, j 间电压的相角差; V —所有与节点 i 相连的节点^[8], $j \in i$ 。

1.2 约束条件

计及电动汽车充电站的配电网综合优化是多变量多约束的非线性规划问题,应满足的约束条件包括功率平衡约束、控制变量约束、状态变量约束以及网络辐射状约束。

(1) 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_i, V_j —节点 i, j 的电压; G_{ij} —导纳矩阵元素的实部; θ_{ij} —节点 i, j 间电压的相角差; j —所有与节点 i 相连的节点, $j \in i$ 。

(2) 控制变量约束:

$$\begin{cases} C_{j,\min} \leq C_j \leq C_{j,\max} \\ T_{k,\min} \leq T_k \leq T_{k,\max} \\ P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max} \\ Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $C_j, C_{j,\max}, C_{j,\min}$ — j 节点电容器投切容量、投切容量上限及下限; $T_k, T_{k,\max}, T_{k,\min}$ —可调变压器变比、变比上限及下限; $P_{Gi}, P_{Gi,\max}, P_{Gi,\min}$ —可调度电动汽车充电站有功出力、有功出力上限及下限; $Q_{Gi}, Q_{Gi,\max}, Q_{Gi,\min}$ —可调度电动汽车充电站无功出力、无功出力上限及下限。

(3) 状态变量约束:

$$\begin{cases} V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \\ S_k < S_k^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $V_i, V_{i,\max}, V_{i,\min}$ —节点电压、电压上限及下限; $S_k, S_{k,\max}$ —线路的传输容量及传输容量上限;

(4) 网络拓扑约束:

综合优化后的配电网要保证辐射状运行,不能有孤岛和环网的存在^[9-11]。

2 基于粒子群算法的配电网综合优化算法

2.1 粒子群算法(PSO)

本研究分析的对象中存在大量的开关、电容器投切组数及电动汽车充电站注入的有功功率及无功功率,是一个非线性组合优化问题。粒子群算法能够较好地求解复杂优化问题,对目标函数没有可导性要求并具有全局收敛性,在求解该类问题中有很好的表现,

因此,本研究应用改进的粒子群算法进行求解。PSO 求解优化问题时,每个粒子都有自己的位置和速度,还有一个由目标函数决定的适应值。本研究首先初始化一群随机粒子,接下来的迭代过程中粒子通过跟踪 2 个极值来更新自己,一个是粒子本身所找到的最好解,另一个是整个种群目前找到的最好解。笔者通过不断跟随变换当前的最优粒子找到最优解^[12]。

2.2 优化变量的编码

本研究首先对网络的初始拓扑结构进行分析,将联络开关连接的两个节点作为编码的始、末节点,沿着始节点向上搜索直至到达末节点,在这一过程中记录下经历的分段开关即得到了与该联络开关对应的环路。当闭合该联络开关时,就要同时打开该环路中的某一分段开关,才可以保证网络始终为辐射状。因此,本研究可以将每一环路作为一个控制变量。具体的编码方法是:将联络开关的编号设为 0,然后沿着某一方向对环路的分段开关依次递增编号,直到走完一圈为止,此时该环路上的所有开关都与一个整数相对应。该环路上的开关开启方案也可以用整数表示,其中 0 表示联络开关开启。该控制变量的下限为 0,上限即为该环路开关数减 1,这样任意一种网络拓扑结构图,均与一组整数相对应。同时,取值范围内的任意一组整数也唯一地对应于一组开关开启方案^[13]。

三馈线系统如图 1 所示。图 1 中,联络开关 S_{15} 所对应的环路为 (1),则环路 (1) 上开关的集合为 $\{S_{15}, S_{19}, S_{18}, S_{16}, S_{11}, S_{12}\}$,则联络开关 S_{15} 的编码为 0;选联络开关的右节点开始编号,对应于上述开关集合的编码为 (0, 1, 2, 3, 4, 5),即该环路编码变量的范围为 $[0, 5]$,在此范围内的任一整数均与一种开关交换方案相对应,例如 1 表示闭合联络开关 S_{15} ,打开分段开关 S_{19} ;而 0 则表示保持联络开关 S_{15} 打开各分段开关闭合的状态,依次对各个联络开关及其对应的环路进行编码,即可形成整套编码方案。判断不可行解的规则是:如果公共开关被打开两次及以上则该解是不可行解,可仿照不等式约束条件的处理方式,直接添加一个大的惩罚量至目标函数,以便将不可行解快速淘汰^[14-15]。

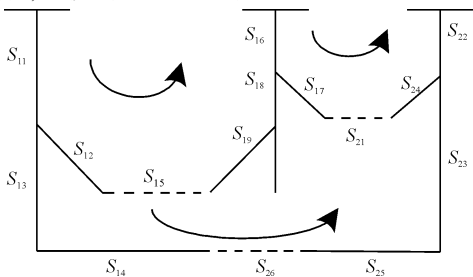


图 1 三馈线系统

无功优化中以可投切电容器的组数为变量,变量的取值范围为 0 至该节点投切电容器的最大组数,变量的维数为可投切电容器的节点总数,与网络重构中的整数编码实现了统一。电动汽车充电站的有功功率和无功功率可实现解耦独立控制,为连续变量,变化范围为可调节功率的上、下限,本研究对其进行实数编码,与配网重构中的开关编码、无功优化中的电容器投切组数编码统一放在一个粒子中,粒子前半部分为开关编码和电容器投切组数编码,其位置和速度更新都采用取整的方式,后半部分为连续变量的功率编码,按照一般的粒子群算法更新位置和速度即可。

3 算例分析

本研究以 IEEE33 配电系统为例(IEEE33 配电系统如图 2 所示)采用上述编码方式,对配电网进行综合优化,其中电容器补偿点选在节点 5 和节点 30,容量分别为 $0.15 \text{ Mvar} \times 5$ 和 $0.15 \text{ Mvar} \times 7$,电动汽车充电站接入节点 12、18、26,有功调节范围为 $0 \text{ MW} \sim 0.3 \text{ MW}$,无功调节范围为 $-0.1 \text{ Mvar} \sim 0.2 \text{ Mvar}$,其中,折线代表联络开关,直线段为分段开关,初始状态下联络开关打开,分段开关闭合,具体参数见文献[14]。

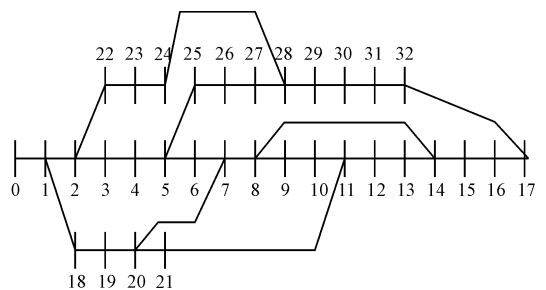


图 2 IEEE33 配电系统

因为系统有 5 个联络开关,故有 5 个基本环路,本研究根据前述环路编码的方式进行编码,计及两个电容器补偿点和 3 个电动汽车充电站接入点,算例中 PSO 粒子的长度为 13,粒子数按照取 4~5 倍粒子长度的原则,设定种群数量 50,最大迭代次数为 200。加速因子都取为 2,惯性权重随迭代次数增加而线性减小,最大为 1.2,最小为 0.6,粒子速度每一维的范围根据粒子位置每一维的范围而确定,大致取为位置范围的 1/2。针对该算例中节点电压均较低的情况,以系统有功网损最小为优化目标。

本研究采用粒子群算法,分别对以下 5 种方案进行分析比较,结果如表 1、图 3 所示。

方案 1:只进行网络重构;

方案 2:先进行网络重构,再进行电容器投切;

方案 3:网络重构和电容器投切优化同时进行;

方案 4:先进行网络重构,再进行电容器投切和电动汽车充电站注入功率优化;

方案 5:网络重构、电容器投切和电动汽车充电站注入功率优化同时进行。

其中,表 1 中的方案 0 表示未进行任何优化的初始状态。

表 1 各方案优化结果

方案	断开开关	电容器	电动汽车充电站注入有功功率/kW		
0	7 ~ 20,8 ~ 14 11 ~ 21,17 ~ 32, 24 ~ 28	0	0		
1	6 ~ 7,10 ~ 11 13 ~ 14,31 ~ 32, 27 ~ 28	0	0		
2	6 ~ 7,10 ~ 11 13 ~ 14,31 ~ 32, 27 ~ 28	5(3) 30(7)	0		
3	6 ~ 7,10 ~ 11 13 ~ 14,17 ~ 32, 24 ~ 28	5(5) 30(5)	0		
4	6 ~ 7,10 ~ 11 13 ~ 14,31 ~ 32, 27 ~ 28	5(2) 30(7)	节点 12 充电站	300	
			节点 18 充电站	300	
			节点 26 充电站	300	
5	6 ~ 7,8 ~ 9 8 ~ 14,31 ~ 32, 24 ~ 28	5(2) 30(5)	节点 12 充电站	300	
			节点 18 充电站	300	
			节点 26 充电站	300	

方案	电动汽车充电站注入无功功率/kW		网损/kW	最低电压/p. u.
0	0		202.497	0.913 1(17)
1	0		132.687	0.945 0(31)
2	0		100.349	0.954 9(32)
3	0		98.080	0.960 4(17)
4	节点 12 充电站	200	76.627	0.962 9(32)
	节点 18 充电站	200		
	节点 26 充电站	66.7		
5	节点 12 充电站	200	64.988	0.965 9(32)
	节点 18 充电站	200		
	节点 26 充电站	200		

表 1 中,电容器项目栏中的括号外面数字为电容器投切的节点位置,里面数字为优化得到的电容器投切的组数;最低节点电压栏中括号里的数字代表最低电压节点的位置。

由表 1 可见,本研究提出的粒子群综合优化算法使网损值得到最大程度的减小,方案 1 中的网损值比初始状态下的网损降低了 34%,最低节点电压也提高不少;方案 2 在方案 1 的基础上通过补偿电容器的合理投切,达到进一步降低损耗的效果,比初始状态降低

了 50%,节点电压得以进一步改善;方案 3 中将重构与电容器投切同时进行,得到的开关组合与方案 2 有所不同,得到的网损值进一步减小,节点最低电压进一步提高,这表明网络重构和无功优化是相互影响的,综合优化比分步优化得到的效果更佳。方案 4 在方案 2 的基础上增加了可控电动汽车充电站参与调度,由于它的加入,网损降低的效果比方案 3 更好,表明网络中有功功率的分布对网损的影响更大;方案 5 将 3 种优化方式统一得到了最佳的优化结果,进一步说明电动汽车充电站的注入功率、电容器的投切、网络重构 3 者是相互关联的,分开优化难以得到最优解,综合起来考虑可以得到最佳的优化效果。

不同优化方案下的配电网网络节点电压情况如图 3 所示。从图 3 中可以看出,优化后的节点电压有了很大提升,特别是无功补偿和电动汽车充电站附近的节点电压改善明显,同时综合优化得到的节点电压曲线比分步优化得到电压曲线更平稳,电压平均值也相对较高,可见综合优化对节点电压质量有很好的改善作用。

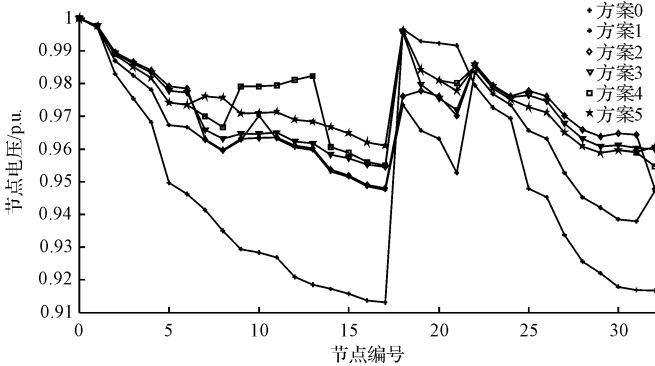


图 3 各方案对应的节点电压

4 结束语

本研究考虑到未来电动汽车的大规模接入以及电动汽车充电站的储能作用,提出了将无功优化、网络重构、电动汽车充电站注入功率控制 3 者统一进行优化的思想,并详细阐述了对应变量的编码方式,最后分别对不同方案下的系统网损进行了比较。

研究结果表明,综合优化下系统的网损和电压质量均优于分步优化的效果。本研究对提高新形势下系统的经济运行效益有一定的指导意义。

参考文献(References):

[1] 张立梅,唐 巍,赵云军,等.分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J].电力系统保护与控制,2011,39(5):91-101.

- [2] 马鸿鹄. 配电网的重构与无功优化[D]. 西安:西安理工大学水利水电学院,2012.
- [3] 王林川,梁 峰,李 漫,等. 含有分布式电源配电网重构算法的研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(5):41-50.
- [4] JIANG D, BALDICK R. Optimal electric distribution system switch reconfiguration and capacitor control [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**,1996,11(2):890-897.
- [5] 王建勋,刘会金,陈 兴. 应用自适应微分进化算法的配电网综合优化[J]. 电网技术,2011,35(8):168-173.
- [6] DE OLIVEIRA M E, OCHOA L F, PADILHA-FELTRIN A, et al. Network reconfiguration and loss allocation for distribution systems with distributed generation[C]// Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin-America, 2004 IEEE/PES. IEEE, 2004: 206-211.
- [7] 赵晶晶,李 新,彭 怡,等. 基于粒子群优化算法的配电网重构和分布式电源注入功率综合优化算法[J]. 电网技术,2009,33(17):162-166.
- [8] 李 强. 配电网无功优化与管理系统[D]. 长沙:湖南大学电气与信息工程学院,2009.
- [9] 黄立文. 电网电压监控分析系统研究与实现[J]. 机电工程技术,2013(08):152-154,22.
- [10] 谢开贵,肖 畅. 计及负荷不确定性的无功优化模型与算法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(4):18-29.
- [11] 毕鹏翔,刘 健,张文元. 以提高供电电压质量为目的的配网重构[J]. 电网技术,2002,26(2):41-43.
- [12] 纪 震,廖惠连,吴青华. 粒子群算法及应用. [M]. 北京:科学出版社,2009.
- [13] 石嘉川. 基于模糊评价的配电网多目标优化研究[D]. 济南:山东大学电气工程学院,2007.
- [14] 麻秀范,张粒子. 基于十进制编码的配网重构遗传算法[J]. 电工技术学报,2004,19(10):65-69.
- [15] 王守相,王成山. 现代配电系统分析 1 版. [M]. 北京:高等教育出版社,2007.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

李 梁,袁 军,高一凡,等. 计及电动汽车充电站的配电网综合优化研究[J]. 机电工程,2014,31(11):1420-1424.

LI Liang, YUAN Jun, GAO Yi-fan, et al. Comprehensive optimization for distribution network with the electric vehicle charging station[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(11):1420-1424.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

(上接第 1386 页)

好的鲁棒性;由参数摄动的情况下所采取的仿真结果表明,新的控制器仍然可以保持系统的稳定。综上所述,该控制器的设计完全满足控制要求。

参考文献(References):

- [1] HAGGAG S, ALSTROM D, EGELJA C S. A Modeling, control, and validation of an electro-hydraulic steer-by-wire system for articulated vehicle applications [J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**,2005,10(6):688-692.
- [2] STANTON N A, MARSDEN P. From fly-by-wire to drive-by-wire; safety implications of automation in vehicles[J]. **Automotive Engineering**,2001,109(9):102-106.
- [3] CHOI S, ALONSO J J, KROO H M. Two-level multi-fidelity design optimization studies for supersonic jets[J]. **Journal of Aircraft**,2009,46(3):776-790.
- [4] OH S W, CHAE H C, YUN S C, et al. The Design of a controller for the steer-by-wire system[J]. **JSME international Journal Series C**,2004,47(3):38-44.
- [5] AMRLLEIN M, KREIN P T. Dynamic simulation for analysis of hybrid electric vehicle systems and subsystems interactions, including power electronics [J]. **IEEE Transactions on, Vehicular Technology**,2005,154(3):825-836.
- [6] CHEN Xiang, YANG Tie-bao, CHEN Xiao-qun. A generic model-based advanced control of electric power-assisted steering systems[J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**,2008,16(6):1289-1300.
- [7] 杨 琳,赵书强. H_{∞} PSS 设计中加权函数的选择及模型降阶[J]. 华北电力大学学报,2003,30(2):15-19.
- [8] 杨文兴,杨俊智,周 强. 汽车线控转向系统的现状及关键技术研究[J]. 机械制造,2013,51(9):79-81.
- [9] PAOLO F, FRANCESCO B, JAHAN A. Predictive active steering control for autonomous vehicle systems [J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**,2007,15(3):566-580.
- [10] SELAMAT H, YUSOF R, GOODALL R. M. Self-tuning control for active steering of a railway vehicle with solid-axle wheel sets[J]. **IET Control Theory and Applications**,2008,5(2):374-383.

[编辑:洪炜娜]