

DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2018.3.84

中图分类号:TM714.3

文献标志码:A

农村配电网无功补偿最佳优化配置

张曙云¹, 匡洪海¹, 唐婷媛², 曾丽琼¹

(1.湖南工业大学电气与信息工程学院,株洲 412007;

2.国网湖南省电力公司邵阳电力经济技术研究所,邵阳,422000)

摘要:针对目前农村配电网规划存在无功补偿方式及补偿点选取盲目情况。通过详细分析和综合比较目前常用的几种无功补偿方式,得出农村配电网无功补偿的最佳方式。对当前一些无功补偿最佳配置点寻优算法进行利弊分析,结合所选取的补偿方式提出的一种按管理区域划分的分区改进型遗传算法,并进行无功的最佳优化。采用该算法对IEEE30节点系统和实际配电供电网络系统进行验算,结果表明该算法既具有收敛速度快、稳定性好和可控性强优点,同时在改善无功补偿效果上优势明显,具有一定的实际应用价值。

关键词:农村配电网;无功补偿;遗传算法

Optimization Configuration of Reactive Power Compensation in Rural Distribution Network

ZHANG Shuyun¹, KUANG Honghai¹, TANG Tingyuan², ZENG Liqiong¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 2. Shaoyang Electric Power Eco-Tech Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Shaoyang 422000, China)

Abstract: Considering the problems existing in the planning of rural distribution network at present, such as reactive power compensation and aimless selection of compensation points, an optimization configuration method for reactive power compensation in rural distribution network is proposed through the analysis and comparison of several commonly used reactive power compensation methods. The advantages and disadvantages of some optimization configuration algorithms for optimal reactive compensation points are analyzed, and an improved genetic algorithm with the partition of management areas is proposed with the combination of the selected compensation method; moreover, it is used to optimize the reactive power. This algorithm is used to check an IEEE 30-bus system and an actual distribution power supply network system. The results show that the proposed algorithm has a fast convergence speed, good stability and strong controllability; at the same time, it has an obvious advantage in improving the reactive power compensation effect, indicating its application value in practice.

Keywords: rural distribution network; reactive power compensation; genetic algorithm(GA)

收稿日期:2016-04-05;修回日期:2018-01-17

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ5009);湖南省教育厅科研资助项目(15C0395);湖南工业大学研究生校级创新基金资助项目(CX1502);湖南省教育厅开放基金资助项目(15K036)

Project Supported by the Hunan Province Natural Science Foundation(2015JJ5009); the Scientific Research Project of Education Department of Hunan Province(15C0395); the Hunan University of Technology Graduate School Innovation Fund (CX1502); Hunan Provincial Department of Education Open Fund Project(15K036)

近年来随着我国农村经济的迅猛发展,工业化城镇化水平不断提高,农村用电需求急剧增加。国家提出农网改造升级计划来进行农村电网结构的优化,解决现阶段农村配电网环节中技术水平落后、设备陈旧、供电质量差等问题,在新的电力发展规划中提出以建设新农村、新电力、新服务农电发展的战略为指导,以安全、质量、效益为核心,坚持科技进步,全面提高农网电压无功综合管理水平,持续改善供电质量,降低电能损耗,为社会主义新

农村建设提供优质、经济、可靠的电力供应^[1]。因此,对于如何解决农村配电网中低电压等电能质量问题,为用户提供优质的电能服务成为关键环节。

农村配网中由于农电负荷分散、季节性强、配电线路的供电半径大、分支线多、用电设备的配置和使用的不合理以及电网中无功电源配置点选取与占用的不平衡,会引发农村电网季节性的配电功率因数偏低和电压质量恶劣等危害电网正常运行的状况,因此合理规划优化无功补偿配置对提高农村配网的供电能力、改善电能质量具有重要意义。无功补偿配置的方式、位置及容量的选取是在电力系统无功规划中应首要解决的问题,选取最优的无功补偿配置的方式、位置及容量对该区域电网运行的经济性、稳定性及电压水平具有重要的影响。

电力系统无功补偿容量的优化算法主要有遗传算法 GA(genetic algorithm)、模拟退火 SA(simulated annealing)算法和粒子群 PSO(particle swarm optimization)算法等,国内外相关学者已对此进行了多方面研究。文献[2]提出了一种采用电力系统分区规划的方法,利用“电气距离”把电力系统分成几个强耦合小区,缩小选优范围来确定无功源的最佳配置地点,但未考虑无功配置的数量方法及最佳寻优方式;文献[3]提出采用混合改进遗传算法来寻找节点无功裕度缺额节点,确定无功补偿点及补偿容量;文献[4]以投资经济性最佳为目标,提出了一种遗传算法与分支定界法相结合的方法;文献[5]从实用角度出发,提出采用遗传算法确定配电网就地无功补偿最佳安装点及补偿容量,并用算例验证了其可行性,但没有采用系统分区方式缩短寻优时间。

基于上述研究,本文提出了一种基于农网分区与改进型遗传算法相结合的方法来确定农村配电网无功补偿中的最佳配置点及补偿容量。该方法依据农村供电基层单位各供电所管理的范围进行分区,同时由潮流跟踪计算出各所区的无功裕度,采用凝聚算法对系统所有分区进行聚合,并确定最优分区数目^[6],以降低网损维持电压正常稳定为目标,在所得各分区采用改进遗传算法在其可行解空间中寻找最优解,最后通过 IEEE30 节点系统及实

际现场运行进行模拟,仿真验证该方法的可行性和有效性。

1 配电网无功补偿方式的选取

为了降低网损、提高系统运行功率因数及改善电能质量,在进行配电网规划时通常需要进行无功优化,无功优化的主要措施是在无功不足的位置进行适当的无功补偿。农村配电网交错复杂且线路范围广,常采用低压无功补偿技术进行优化,其中常用的方式有变电站集中补偿、杆上配变补偿和低压分散跟踪补偿。

1.1 变电站集中补偿

变电站集中补偿主要是指补偿主变和高压输电线路对无功容量的需求,35 kV 变电站的补偿容量一般按主变容量的 10%~15%来确定^[7]。但在实际的工程规划中应综合考虑供电区内的无功潮流和配电线路及用户的电压质量水平来确定无功补偿容量,对其无功功率缺额进行集中补偿。采取变电站集中补偿有利于对无功补偿装置的管理与维护,然而针对农村供电区部分的低电压问题及整体电网线路损耗的改善作用却不明显。

1.2 杆上配变补偿

杆上配变补偿是指在农网无功缺额较严重的供电区域内,选取其中无功缺额最大的配电变压器节点,将低压电容器通过低压保险接在配电变压器二次侧,以补偿配电变压器空载及用户无功的补偿方式,杆上配变补偿接近用户具有补偿效率高、投资小及操作简单等优点,能有效地补偿配变空载无功、限制农网无功基荷,使该部分无功就地平衡,从而提高配变利用率、降低网损,是目前补偿无功最有效的手段之一,同时本文在研究中采用该补偿方式。但是由于配置点往往远离变电站,同时受到地理环境、气候、空间位置等因素的影响^[8],因此对继电保护的配置及控制将有不不利影响。

1.3 低压分散跟踪补偿

由于县乡镇级工业配电网中有很大部分的无功功率消耗在电动机上,低压分散跟踪补偿是在无

功补偿全面规划、合理布局、分级补偿和就地平衡的原则下,在农村地区乡镇工业比较集中且电动机运行时间长的地方,对电动机的无功消耗采用就地补偿的补偿方式,在无功补偿装置上采用自动跟踪投切电容器,根据无功负荷的变化实时确定无功缺额进行电容器的自动投切,该补偿方式不仅运行灵活、补偿精度高而且维护工作简便。但所需的控制保护装置较复杂,造价较贵,在现阶段还难以在农村地区大规模推广应用。

2 无功补偿配置数学模型的确定

目前,整个电网系统中的配电网损占整体网损的 80%以上,因此有必要通过无功补偿措施降低配电网的网损,提高供电企业经济性^[7]。配电网的无功优化是通过优化系统的潮流分布,保证各个节点电压处于正常水平内,在优化潮流分布过程中首先确定各节点的潮流状态,以区域系统网损最小为目标函数,通过改进的遗传算法搜索确定配电网中无功配置的最佳容量及节点位置。

以该区域配电网网损最小为目标函数,即

$$\begin{aligned} \text{Min } F = & \sum_1^{n_1} G_{k(i,j)} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \\ \text{s.t } & f_0(P, Q, V, \theta) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_{i_{\min}} \leq T_i \leq T_{i_{\max}} \\ C_{j_{\min}} \leq C_j \leq C_{j_{\max}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} V_{gk_{\min}} \leq V_{gk} \leq V_{gk_{\max}} \\ V_{i_{\min}} \leq V_i \leq V_{i_{\max}} \\ Q_{j_{\min}} \leq Q_j \leq Q_{j_{\max}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: T 为选取分接头可调变压器变比; C 为补偿电容器容量; P 、 Q 分别为节点注入有功功率、无功功率; V 为节点电压; V_g 为发电机端电压; n_1 为节点总数; i 与 j 为网络节点。式(1)为潮流方程约束,式(2)为控制变量约束,式(3)为状态变量约束。

由于农村配网结构复杂,需要考虑众多的约束条件,无功补偿配置优化过程中针对需要保证节点电压质量、补偿电容器不越界及补偿功率因数的约

束等非线性规划问题,通过在目标函数中采用罚因子的方式将这些有约束的非线性问题转化为无约束最优化问题来求解,因此,引入惩罚函数,即

$$\begin{aligned} \text{Min } F = & \sum_1^{n_1} G_{k(i,j)} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] + a_1 \cdot \\ & \sum_{j=1}^{n_1} \frac{|U_j - U_j^{\text{sp}}|}{\Delta U_j^{\text{sp}}} + a_2 |Q_c - Q_1| + a_3 \cos \varphi_{\min} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: n 为除平衡节点外的节点总数; U_j^{sp} 为节点给定电压, ΔU_j^{sp} 为节点电压给定的最大偏移量; Q_c 为节点实际注入的无功功率; Q_1 为预算所安装的补偿电容器无功容量; a_1 、 a_2 和 a_3 分别为对应电压偏移、补偿容量超过预算定额和功率因数越限的惩罚因子; $\cos \varphi_{\min} \leq \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q - Q_c)^2}}$ 。

3 配电网无功源最佳配置点的选择

3.1 配电网的分区

在进行农村电网规划时,由于其涉及范围广、输送线路地理环境复杂,因此合理的分区有利于提高电网安全稳定运行水平,在进行配电网的无功优化时,首先对所优化的区域进行配电网分区,然后在各分区中进行优化选择,以避免整体区域寻优无功配置点的繁琐与盲目。对目标区域分区方式通常按照其地理状况及负荷的分布情况而定,本文采取由各基层供电所管理的台区地理范围来定,这样既节约了分区的时间和方便管理,同时更符合当地电网实际运行的情况。

3.2 配电网无功优化算法

配电网无功优化、配置点寻优算法的方法多样,由于GA可以依靠父系遗传使得上一代寻优结果能用来进行到下一代寻优,可以最大概率地寻找到全局最优解,同时具有占用运行空间少、也很少存在易局部收敛如禁忌搜索算法等优点,在配电网无功优化中得到广泛应用。

但传统GA运用在大型电网系统中进行寻优时,存在计算时间长、计算量大等缺点。针对传统GA的缺点,本文在优化寻优模型和算法方面进行了改进,提出一种按管理区域划分的分区改进型遗

传算法来进行无功的最佳优化。首先引入罚函数对目标函数模型进行约束,其次根据原有电网管理的地理区域为分区依据进行寻优空间的划分,在各分区中分别同时采用改进的遗传算法寻优,最后通过凝聚、比较,确定最佳解,有效地避免了寻优计算时间长、收敛慢和计算量大等问题,同时使得无功补偿配置更可靠合理。

3.3 改进的遗传算法

在分区的基础上,本文采用分层遗传算法对每个分区分别进行寻优,整个初始数据群产生 $N \times n$ 个样本,将其分成 N 个子种群,对各子种群所包含的 n 个样本分别进行遗传算法寻优,记为 $G_{Ai}(i=1, 2, \dots, N)$,这 N 个子种群在设置特性上有较大差异,因此在分区寻优时对于优良种群将更易凸显出来,这样使各优劣节点得到明显的区分,提高了寻优的速度。

3.3.1 编码方法

在运用遗传算法求解无功补偿的优化问题时,常采用二进制整数编码^[9]。但由于二进制表示个体位串很长,而稍复杂的配电网网络中存在一些开关同时附属于多个环网的情形,若一开始进行标记将会失去部分组合,导致可能失去最优解,也降低了计算效率,因此本文采用直接编码方式,将配电网中开关的状态分别用 0 和 1 表示,每个开关状态量只占个体位串的一位,各个开关状态组合成一条个体位串,个体位串的长度即为开关总数目。

3.3.2 遗传操作

遗传操作包含种群初始化生成方案、交叉与变异规则和适应值函数的确定等,本文采用直接编码和单亲遗传交叉方式。初始化种群在各分区中采用随机选取,使在采用直接编码的方式下包含所有的开关状态,单亲遗传只有一个父代,通过自身的基因变化产生下一代,单亲遗传交叉操作对于交叉位置可以不做限制,这样可避免在寻优计算中出现大量不可行解。同时在进行变异规则选取时为提高计算效率,采用个体位的位变异成对进行,当出现有不可行解时采用文献[10]中的利用图论与搜索技术相结合的方案进行修复。适应值函数是遗传算法指

导搜索的唯一指向标,适度函数值递增最大化的方向必须对应目标函数的优化,由无功补偿的数学模型确定的目标函数可知,可采用网损最小和节点合格电压个数最多作为遗传迭代终止条件。

3.4 遗传计算过程

利用改进遗传算法求解无功最佳补偿节点及容量,同时采用凝聚算法选出最佳补偿点的总体流程如图 1 所示。

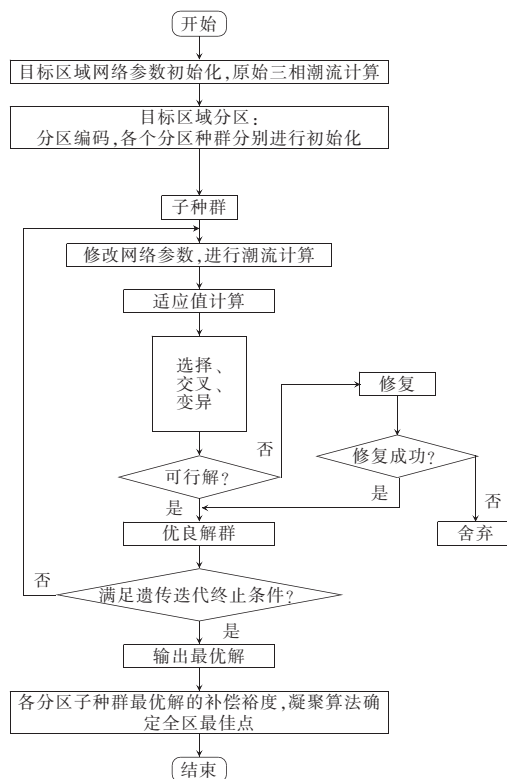


图 1 总体程序框图

Fig.1 Block diagram of overall program

4 算例分析

采用 IEEE 标准 30 节点配电网数据进行分析,由于标准节点系统中没有实际的供电所管理的区域划分,所以本文仅利用改进的遗传算法进行验证,其网络结构如图 2 所示,其中包含 6 台发电机,分别位于节点 1、2、5、8、11 和 13;4 台可调变压器,分别位于 4~12、6~9、6~10、27~28 的支路上,选取功率基准值 $S_b=100$ MVA,系统运行时间为 8 760 h,同时设定各节点的电压范围为 $(1.1 \sim 0.9)U$

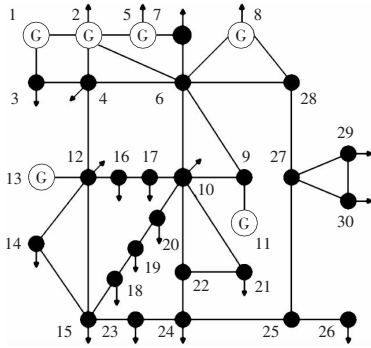


图 2 IEEE 30 节点系统拓扑

Fig.2 Topology of IEEE 30 node system

(U 为额定电压), 确定补偿电容器组每个节点为 1~3 kvar, 系统预算最大组数容量为 15 kvar, 惩罚因子 $a_1=a_2=a_3=1.0$, 选取种群个体为 50, 种群优化代数为 100, 选择算子为 0.9, 交叉算子 0.8, 变异算子为 0.9, 运用 Matlab 编程, 对 IEEE30 节点系统进行了潮流计算, 所得无功缺额最大的 4 个节点分别是节点 6、19、27、30, 因此 4 台无功补偿设备设在这 4 处, 根据缺额程度在节点 19、27、30 安装各 2 组电容器, 在节点 6 安装 1 组电容器。采用本文改进 GA 和传统 GA 及其补偿前后采用本文改进算法所计算的电压质量进行比较, 潮流计算结果分别如表

1、表 2 所示。

IEEE30 节点算例中传统 GA 潮流计算结果有功损耗为 0.100 2(p.u.), 而改进 GA 潮流计算结果有功损耗为 0.093 8(p.u.), 可见, 本文改进 GA 方案能有效减小网损, 有较好的优化效果, 同时在进行优化配置补偿后, 线损率从 7.05% 下降至 6.91%, 优化后的各节点电压水平均有所改善。

以邵阳地区某乡镇地区的 10 kV 配电线路为实例, 利用 PSASP 电力系统分析仿真软件进行建模分析。其乡镇地区供电公司配电系统实际运行网络结构如图 3 所示。首先, 根据实际供电所管理的区域进行分区, 结果如表 3 所示, 其次在所有分区内同时采用该方法进行验证计算, 确定最佳补偿配置节点及容量, 并利用前述分析的杆上配电补偿方式在无功缺额严重节点进行电容器补偿。经过算法分析计算在 10 kV 磨观线 I 支线的 P06 节点、10 kV 磨观线 II 支线的 P04 节点、资洲 2 台区的 P30 节点为最佳补偿点, 在 P06 节点投入 1 组电容器而在 P04 节点、P30 节点分别投入 2 组电容器, 此时系统网络损耗最小。实际运行系统优化配置前后电压质量及用户低电压合格率比较如表 4 所示。该地

表 1 2 种算法的潮流计算结果比较

Tab.1 Comparison of power flow calculation results between two algorithms

节点 编号	计算电压(p.u.)		优化配置电压质量%		节点 编号	计算电压(p.u.)		优化配置电压质量%	
	传统 GA 法	改进 GA 法	补偿前	补偿后		传统 GA 法	改进 GA 法	补偿前	补偿后
1	1.070 0	1.086 4	95.83	96.57	16	1.034 0	1.049 9	91.65	96.53
2	1.055 0	1.066 6	91.65	94.53	17	1.022 8	1.048 6	91.65	96.53
3	1.035 2	1.065 3	91.65	94.53	18	1.017 5	1.054 3	91.65	98.52
4	1.026 9	1.059 7	91.65	96.57	19	1.012 3	1.059 7	91.21	100
5	1.011 0	1.040 6	91.65	96.57	20	1.015 1	1.058 2	91.65	95.53
6	1.012 8	1.053 6	91.32	100	21	1.012 3	1.044 9	91.65	95.53
7	1.008 5	1.040 9	91.65	94.53	22	1.012 8	1.046 0	91.65	95.53
8	1.010 0	1.046 3	91.65	94.53	23	1.013 1	1.042 1	91.65	95.53
9	1.042 0	1.058 0	91.65	94.53	24	0.999 4	1.041 8	91.65	95.53
10	1.025 2	1.055 2	91.65	94.53	25	0.997 6	1.057 0	91.21	96.87
11	1.082 0	1.070 5	93.83	94.53	26	0.979 5	1.040 0	91.65	96.83
12	1.053 8	1.059 0	91.65	94.53	27	1.005 4	1.075 0	91.21	100
13	1.071 0	1.086 4	95.83	100	28	0.995 1	1.037 5	91.65	100
14	1.036 6	1.049 0	91.65	96.53	29	0.987 7	1.061 7	91.21	100
15	1.029 8	1.048 6	91.65	96.53	30	0.974 9	1.053 4	91.65	100

ese).

- [4] Maurizio D, Gianpietro P, Granelli P M, et al. Optimal capacitor placement using deterministic and genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(3):1041-1046.
- [5] 张粒子, 舒隽, 林宪枢, 等. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6):5-8.
Zhang Lizi, Shu Jun, Lin Xianshu, et al. Reactive power planning based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6):5-8(in Chinese).
- [6] 宫一玉, 吴浩, 杨克难. 一种基于潮流追踪的电力系统无功控制分区方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9):29-33.
Gong Yiyu, Wu Hao, Yang Kenan. A network partition method for power system reactive power control based on power flow tracing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9):29-33(in Chinese).
- [7] 王承民, 刘莉. 配电网节能与经济运行[M]. 北京:中国电力出版社, 2012
- [8] 孙立满, 陈继军. 农村配电网中无功补偿的探讨[J]. 安徽电力, 2008, 25(4):73-76.
Sun Liman, Chen Jijun. Discussion on reactive power compensation for rural distribution system[J]. Anhui Electric Power, 2008, 25(4):73-76(in Chinese).
- [9] 陈树勇, 申洪, 张洋, 等. 基于遗传算法的风电场无功补偿及控制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 1-6.

Chen Shuyong, Shen Hong, Zhang Yang, et al. Researches on the compensation and control of reactive power for wind farms based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 1-6(in Chinese).

- [10] 麻秀范, 崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.

Ma Xiufan, Cui Huanjun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181(in Chinese).



张曙云

作者简介:

张曙云(1992-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:农村配电网规划及新能源并网,E-mail:sy_zhang14@163.com。

匡洪海(1972-),女,博士,副教授,研究方向:配电网停电管理,E-mail:khhzyz@163.com。

唐婷媛(1991-),女,本科,助理工程师,研究方向:电网规划研究,E-mail:1271518672@qq.com。

曾丽琼(1991-),女,硕士研究生,研究方向:风力发电并网,E-mail:346133707@qq.com。