

基于线性化潮流的配电网无功优化

黄可成¹, 余志强², 王 淳¹, 敖 鑫¹, 王庆铭¹, 王华峰¹

(1. 南昌大学 电气与自动化工程系, 江西 南昌 330031; 2. 国网上饶供电公司, 江西 上饶 334000)

摘要: 运用一种线性化法计算配电网潮流, 构建了一种计及电压稳定性系数和网损的综合因子最小化的无功优化模型, 并采用含衰老与竞争机制的粒子群算法(ACM-PSO)进行求解。IEEE33 和 PG&E69 节点测试系统的应用结果表明, 线性化法无功优化在 10^{-4} 的数量级误差下, 其计算速度与前推回代法和牛顿拉夫逊法下的无功优化相比具有明显的优势。

关键词: 配电网; 线性化法; 电压稳定性系数; 含衰老与竞争机制的粒子群算法; 无功优化

中图分类号: TM743

文献标志码: A

1 引言

配电网潮流计算是配电网经济运行和无功优化规划的重要基础。常见的计算方法有牛顿拉夫逊法(LP)、隐式 ZBus 高斯法、快速解耦法、前推回代法(FBS)。其中, LP 法收敛速度快, 但每次迭代均需重新计算雅克比矩阵, 计算时间较长且对初值的选取十分苛刻, 迭代的次数与是否收敛及初值的选取密不可分; 隐式 ZBus 高斯法具有较好的收敛性, 但内存耗用较高; 快速解耦法虽然求解速度较快, 但配电网支路 R/X 比值不能满足快速解耦法的要求使得计算不收敛; FBS 法在计算过程中具有数值稳定性好、效率高等优点, 在仅为恒功率负荷模型的情况下, FBS 法和 LP 法具有相似的收敛特性, 但存在处理环网的能力较弱、通用性差的缺陷。线性化处理方法是指将非线性方程按泰勒级数展开, 再作近似处理成线性方程, 已发展至复数领域^[1], Garcés A^[2] 基于负荷 ZIP 模型, 将线性化法引入低压配电网潮流计算中。鉴此, 本文推导出单相线性化法潮流方程组, 提出单相线性化潮流方法, 并将其引入无功优化中, 建立了一种新的包含电压稳定性系数和网损的无功优化模型, 运用含衰老与竞争机制的粒子群算法(ACM-PSO)^[3]进行寻优, 对 IEEE33 和

PG&E69 节点系统的测试结果表明, 线性化法一定程度上提升了潮流计算的时效性。

2 无功优化模型

2.1 配电网有功损耗

配电网有功损耗为:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^{n_L} R_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{V_k^2} \quad (1)$$

式中, P_{loss} 为配电网总的有功损耗; n_L 为总的支路数; R_k 为支路电阻; P_k 、 Q_k 分别为支路末端的有功、无功功率; V_k 为支路末端的电压幅值。

2.2 电压稳定性系数

电压稳定性系数的计算公式^[4]为:

$$V_{\text{SFtotal}} = \sum_{k=1}^{n_L} 2V_{k+1} - V_k \quad (2)$$

式中, V_{k+1} 、 V_k 分别为同一支路末端和支路首端的电压幅值, 如 V_1 代表第一条支路的首端电压, V_2 代表第一条支路的末端电压或第二条支路的首端电压(在计算过程中设置支路首节点编号与支路编号相等)。

V_{SFtotal} 越高, 系统整体电压越稳定。

2.3 目标函数

本文提出一种计及 V_{SF} 和网损的综合因子最小化无功优化模型, 可在降低网损的同时提高电

收稿日期: 2016-12-27, 修回日期: 2017-02-07

基金项目: 2016 年南昌大学研究生创新专项资金项目(cx2016258)

作者简介: 黄可成(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析, E-mail: 394950367@qq.com

通讯作者: 王淳(1963-), 男, 教授、博导, 研究方向为电力系统规划、优化理论在电力系统中的应用, E-mail: cu_wang

@126.com

压稳定性。鉴于 V_{SF} 值越大系统电压水平越好,需对 $V_{SFtotal}$ 进行倒数处理,使其和网损的优化方向一致,并引入权重因子 c_1 、 c_2 ,因此无功优化模型可表示为:

$$F_{\text{fitness}} = c_1 P_{\text{loss}} / P_{\text{loss}0} + c_2 V_{\text{SFtotal}} / V_{\text{SFtotal}0} \quad (3)$$

式中, $P_{\text{loss}0}$ 为优化前的有功功率损耗; $V_{\text{SFtotal}0}$ 为优化前的电压稳定性系数。

2.4 约束条件

2.4.1 等式约束

潮流计算中的潮流方程式的约束为:

$$P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^{N_b} V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$Q_{Gi} + Q_{ci} - Q_{Li} = \sum_{j=1}^{N_b} V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (5)$$

其中 $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$

式中, P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为在节点 i 中注入的有功和无功功率; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为接入节点 i 中负荷的有功功率和无功功率; V_i 、 V_j 分别为节点 i 、 j 的电压; θ_{ij} 为 i 、 j 两节点电压相角差; Q_{ci} 为接入节点 i 中的无功补偿容量; N_b 为系统的总节点数。

2.4.2 不等式约束

电压约束为:

$$V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \quad i \in N_b \quad (6)$$

式中, $V_{i\min}$ 、 $V_{i\max}$ 为节点 i 电压的下限和上限。

无功补偿量约束为:

$$0 \leq Q_{ci} \leq Q_{ci\max} \quad (7)$$

式中, $Q_{ci\max}$ 为节点 i 无功补偿容量最大值。

3 线性化潮流

3.1 基本方程式

节点电压与节点电流关系式如下:

$$\begin{bmatrix} I_S \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{SS} & Y_{SN} \\ Y_{NS} & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ V_N \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, I 为注入电流; V 为电压; Y 为节点导纳矩阵; S 为源节点; N 为非源节点集(可表示一个向量,也可表示一个数)。

用注入电流表示潮流方程时,其注入电流式可表示为:

$$I_N = S_N^* / V_N^* \quad (9)$$

式中, S_N^* 为节点负荷视在功率的共轭; V_N^* 为非源节点集电压的共轭。

3.2 线性化处理

受泰勒级数展开式启发,电压可表示为:

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{1 - \Delta V} = \sum_{n=0}^{+\infty} (\Delta V)^n \quad (10)$$

式中, V 为节点电压; ΔV 为源节点与节点电压的差。

忽略式(10)的高阶项,电压表达式为:

$$1/(1 - \Delta V) \approx 1 + \Delta V = 2 - V \quad (11)$$

$$e_{\text{error}} = 1/V - (2 - V) \quad (12)$$

式中, e_{error} 为节点误差。

由式(10)可知, ΔV 越大,线性化误差越大,在系统正常运行下,节点负荷越大,电压越低,线性化法误差越大。如某节点电压为 0.9,但线性化法所产生的误差仅为 1.11%。

3.3 线性化潮流

对式(9)进行线性化处理,可得:

$$I_N = S_N^* (2 - V_N^*) \quad (13)$$

将式(13)代入式(8)可得 V_N 线性表达式为:

$$2S_N^* - S_N^* V_N^* = V_S Y_{NS} + Y_{NN} V_N \quad (14)$$

式中 S_N^* 、 Y_{NS} 、 Y_{NN} 均已知, V_S 为源节点的电压值(一般可设为 1)。故式(14)中只有 V_N 一个未知量,通过线性方程可直接求出非源节点集的电值。

电压的实部和虚部计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} V_{Nre} \\ V_{Nim} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Nre}^* + Y_{NNre} & S_{Nim}^* - Y_{NNim} \\ S_{Nim}^* + Y_{NNim} & -S_{Nre}^* + Y_{NNre} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -(Y_{NS} V_S - 2S_N^*)_{re} \\ -(Y_{NS} V_S - 2S_N^*)_{im} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中,下标 re、im 分别表示实数部分和虚数部分。

4 含衰老与竞争机制的粒子群算法

含衰老与竞争机制的粒子群算法(ACM-PSO)是在基本粒子群算法(PSO)的基础上基于自然界中普遍存在的衰老与竞争机制改进而成。粒子速度和位置的更新公式为:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + z_1 r_1 (p_{\text{best}id}^k - x_{id}^k) + z_2 r_2 (L_{\text{Leader}d} - x_{id}^k) \quad (16)$$

$$|v_{id}^{k+1}| \leq v_{d,\max} \quad (17)$$

速度约束:

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (18)$$

式中, v_{id}^{k+1} 为种群 i 在 d 维搜索空间中第 $k+1$ 次迭代的速度; ω 为惯性权重; z_1 、 z_2 均为学习因子; r_1 、 r_2 均为在 $[0, 1]$ 随机产生的数; p_{best} 为粒子自身位置的最佳值; $L_{\text{Leader}d}$ 为当前种群中的最优值,是受衰老和竞争机制约束并具有领导力的个体; $v_{d,\max}$ 为粒子速度的约束值。

关于 L_{Leader} 的竞争机制及领导力的判定,参见文献[3]。

算法计算流程如下。

步骤 1 输入配网参数并设置 ACM-PSO 参数。

步骤 2 计算配电网初始的潮流及网损值。

步骤 3 参照文献[5]算得补偿点的位置,在指定搜索界限内随机生成 M 个解(M 为粒子种群规模),计算各粒子的适应度值, p_{best} 、 L_{Leader} 取最小适应度值对应的位置向量。

步骤 4 对迭代次数进行判断,若达到最大迭代次数则输出历史最佳极值 g_{best} ,并输出 g_{best} 适应度所对应的网损和 $V_{SFtotal}$ 值;反之,则执行步骤 5。

步骤 5 根据式(16)、(18)更新粒子的速度和位置,若有越界则取相应的边界值。

步骤 6 对粒子 i 进行位置向量更新后,若所对应的适应度函数值小于所有适应度函数值,则将 p_{best_i} 替换为更新后的位置向量。另对 L_{Leader} 进行调整,若更新后的种群中所有粒子的适应度最小值小于 L_{Leader} 的适应度函数值,则将 L_{Leader} 更新为对应最小适应度值的解,同时保留最小适应度值中的网损和 $V_{SFtotal}$ 的值。

步骤 7 比较 L_{Leader} 与 g_{best} 的适应度值的大小;若 g_{best} 的适应度值小于 L_{Leader} 的适应度值,则 g_{best} 保持不变;若 g_{best} 的适应度值大于 L_{Leader} 的适应度值,则将 g_{best} 更新为 L_{Leader} 对应的位置向量, L_{Leader} 仍然保持不变。

步骤 8 调整 L_{Leader} 寿命并对 L_{Leader} 的领导力进行评估后,转步骤 4 至最大迭代次数为止。

5 算例分析

以 IEEE33^[6] 和 PG&E69^[7] 为例进行分析,以 Matlab2015a 为平台编写无功优化程序,电脑配置 CPU 为 Inter(R) Core(TM) i7-4790 CPU @3.60GHz 3.60GHz、运行内存为 16.00GB。

学习因子 $z_1 = z_2 = 2$, 惯性权重 w 从 0.9 线性递减至 0.4, 可使 ACM-PSO 具备优良的全局寻优能力^[8]。竞争者评估代数 $T=2$ 能保证算法具有很好的全局稳定性^[3]。经对测试系统反复测试,IEEE33 节点测试系统粒子种群数为 5, 最大迭代次数为 150, L_{Leader} 寿命为 10 能达到寻最优解成功率 100%。取 PG&E69 节点种群数为 5, 最大迭代次数为 250, L_{Leader} 寿命为 12 能达到寻最优解成功率 100%。电容器参数参照文献[7], 选取单组电容器的容量为 30 kvar, 总容量上限为 1 500 kvar。结合文献[5]所提出的算法求得 IEEE33 节点系统补偿点的位置为节点 12、23、29; PG&E69 节点系统补偿的位置为节点 4、9、20、50。

5.1 测试系统结果

以 PG&E69 为测试系统,以网损最小化为优化目标,利用线性化法和前推回代法进行潮流计算获得无功优化结果分别为 145.310、145.400 kW,与文献[7]的无功优化结果(147.728 kW)相比较可知,本文的优化结果较文献[9]算得的网损值低 2 kW 左右,比利用前推回代法计算的无功优化结果略微偏小。

表 1 为 PG&E69 系统在不同权重因子下优化前和应用线性化法进行无功优化补偿后的网损值、 V_{SF} 、电压最低幅值及其节点位置。表 1 中, c_1 为网损权重, c_2 为 V_{SF} 权重, $c_1 = c_2 = 0$ 表示网络初始潮流计算结果。由表 1 可知,随着 V_{SF} 权重加大,系统网损值增大, V_{SF} 亦得到相应的提升。

表 1 不同权重下的无功优化结果

Tab.1 Results of reactive power optimization in different weight

c_1	c_2	网损/kW	V_{SF}	电压最低幅值	节点号
0	0	225.000	66.404	0.909 1	53
1	0	145.315	66.629	0.931 8	53
0.9	0.1	145.313	66.635	0.931 9	53
0.8	0.2	145.313	66.635	0.931 9	53
0.7	0.3	145.313	66.635	0.931 9	53
0.6	0.4	145.321	66.639	0.932 0	53
0.5	0.5	145.322	66.639	0.932 0	53

5.2 线性化法无功优化误差分析

为验证线性化法无功优化的精确性,在网损权重因子为 0.6、 V_{SF} 权重因子为 0.4 的情况下,给出 IEEE33 节点和 PG&E69 测试系统分别利用前推回代法和线性化法进行无功优化后的各节点电压幅值偏差图,见图 1。由图 1 可知,线性化

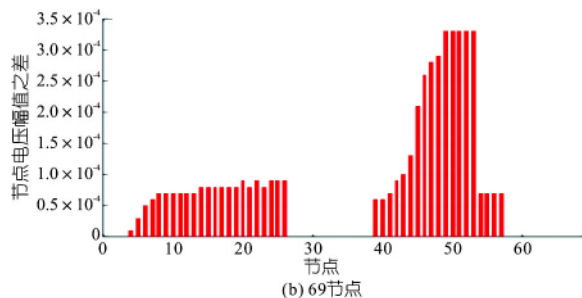
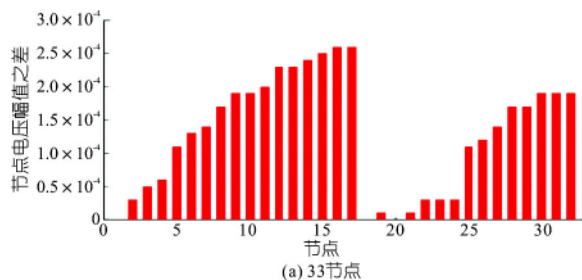


图 1 33、69 节点线性化法无功优化的电压偏差

Fig.1 Voltage deviation of reactive power optimization based on linearized method for 33 and 69 bus system

法和前推回代法无功优化的电压偏差为 10^{-4} 数量级,两种方法中 IEEE33、PG&E69 节点测试系统最大误差率分别为 0.027 7%、0.032 9%,最大误差点在节点 17、53 处,其均为系统电压幅值最低点。

5.3 线性化法无功优化的时间优势

鉴于测试时间与随机选取的初值有关,为了准确比较时间,各方法重复计算 100 次并取平均值,仍置网损权重因子为 0.6、 V_{SF} 权重因子为 0.4。表 2 列出了 IEEE33 节点与 PG&E69 节点分别运用牛顿拉夫逊法、前推回代法、线性化潮流法进行无功优化的时间比较。由表 2 可知,与牛顿拉夫逊法和前推回代法相比,线性化法无功优化时间具有明显的优势,尤其适用于大型配电网。

表 2 无功优化结果的时间比较

Tab.2 Comparison of time for reactive power optimization

测试系统	LP	FBS	线性化法
IEEE33	28.939 3	20.350 2	11.355 7
PG&E69	39.176 7	31.827 3	16.574 9

6 结论

a.相比于牛顿拉夫逊法,线性化法求解潮流避免了求解雅克比矩阵和反复迭代。

b.在误差为 10^{-4} 数量级下,线性化法无功优化比牛顿拉夫逊法和前推回代法无功优化在计算速度上快一倍以上。

c.随着节点数目的增加,线性化法无功优化的时间优势越明显,无功优化效率更高。

参考文献:

[1] Flanigan F J.Complex Variables(Dover Books on Mathematics)[M].NY,USA:Dover,2010.

[2] Garces A. A Linear Three-Phase Load Flow for Power Distribution Systems[J].IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(1):827-828.

[3] Chen W N,Zhang J,Lin Y,et al.Particle Swarm Optimization with an Aging Leader and Challengers [J].IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2013,17(2):241-258.

[4] Kayal P,Chanda C K.Placement of Wind and Solar Based DGs in Distribution System for Power Loss Minimization and Voltage Stability Improvement [J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2013,53(4):795-809.

[5] 余健明,张栋,姚李孝.基于一种新待补偿点定位法的配电网无功优化[J].电网技术,2004,28(1):67-70.

[6] Goswami S K,Basu S K.A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization[J].IEEE Transactions on Power Delivery,1992,3(3):1 484-1 491.

[7] Baran M E,Wu F F.Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems[J].IEEE Transactions on Power Delivery,1989,4(1):725-734.

[8] Shi Y,Eberhart R C.Empirical Study of Particle Swarm Optimization[C]//Proceddings of the Congress of Evolutionary Computation, IEEE, 1999: 1 945-1 950.

[9] 王威,韩学山,车仁飞,等.快速实用的配电网电容器优化投切算法[J].电网技术,2010,34(5):99-103.

Reactive Power Optimization of Distribution Network
Based on Linearized Power Flow

HUANG Ke-cheng¹, YU Zhi-qiang², WANG Chun¹, AO Xin¹, WANG Qing-ming¹, WANG Hua-feng¹

(1. Department of Electrical and Automatic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. China State Grid Shangrao Power Supply Company, Shangrao 334000, China)

Abstract: Linearized method was used to calculate the power flow of distribution network. And then reactive power optimization model was established by minimizing the voltage stability factor and network loss. The model was solved by particle swarm optimization with an aging and competitive mechanism. Simulation results of IEEE33 and PG&E69-bus system show that reactive power optimization based linearization method in the order of magnitude error of 10^{-4} , its calculation speed is faster than that of forward and backward sweep method and Newton Raphson method.

Key words: distribution network; linearization method; voltage stability factor; particle swarm optimization with an aging and competitive mechanism; optimal reactive power