考虑负荷动态特性的油田配电网高压无功优化技术研究

抽油机动态负荷特性致使油田高压配电网功率流动呈现波动性，因此不能依据单一的负荷水平对高压配电网进行并联电容器无功配置。基于抽油机周期性交变的载荷特点，利用负荷概率模型提出一种考虑负荷动态特性的油田配电网高压无功补偿优化方法。该方法以最小化年度总费用为目标建立无功优化数学模型，利用目标灵敏度确定电容器补偿位置，采用差分进化算法对电容器优化容量进行求解。最后通过实例分析，验证了该方法的有效性和实用性。

崔永谦/胜利石油管理局电力管理总公司
康忠健　陈　瑶　陈　醒/中国石油大学（华东）电气工程系

崔永谦/高级工程师

关键词/Keywords
动态负荷特性·
负荷概率模型·
高压无功优化·
差分进化算法·

目前，油田配电网线路平均功率因数小于0.6，通过无功补偿提高线路功率因数可以有效地降低网损，达到节能增效的目的。油田配电网高压无功补偿包括电容器补偿位置的优化和补偿容量的优化两部分。

传统的油田配电网高压无功优化方法是将抽油机负载按照等额分配的原则模拟为静态负载，然后再进行补偿计算。然而，抽油机负载是一种功率需求变化剧烈的动态载荷，若仅将其视为单一的静态负荷对油田高压配电网进行无功配置，难以保证所得方案在其他负荷水平下的经济性和稳定性。因此对油田电网而言，基于动态负荷特性下的并联电容器无功补偿优化配置的研究意义重大[1-5]。

本文针对传统油田配电网高压无功优化方法的不足，并根据油田抽油机周期性交变的特殊动态负荷特性，提出一种利用抽油机负荷概率来模拟油田配电网动态负荷特性，以此实现油田配电网高压无功优化补偿的方法。为提高油田企业经济效益，该方法以最小化年度总费用为目标建立动态无功优化数学模型。考虑到油田配电网多分支、多节点的特点，该方法运用目标灵敏度分析选择最优安装节点，然后采用简单、高效、收敛性好且鲁棒性强的差分进化算法求解油田高压配电网无功补偿容量。

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）。

考虑抽油机动态负荷特性的油田配电网高压无功补偿优化模型

1. 考虑抽油机动态负荷特性的负荷概率模型

抽油机负载上下冲程周期性交替，上冲程时，异步机带动抽油机提起抽油杆和油柱，抽油机负载较大，异步机重载运行；下冲程时，依靠抽油杆和油柱自身重力就能够下行，抽油机负载较小，此时异步机就会轻载运行甚至会出现倒发电状态[6-8]。抽油机动态负荷特性示意图如图1所示。

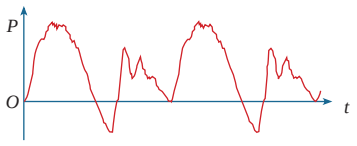

图1　抽油机负荷特性示意图

由图1可见，抽油机负载是一种负荷波动剧烈的周期性载荷，若等效成负荷水平单一的静态负荷，势必对仿真结果产生很大影响。因此，本文根据抽油机的独特负荷特性，选取$t_1 \sim t_2$（$t_2 - t_1$大于

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

等于抽油机负荷周期T）时间段内负荷功率作为研究对象，将抽油机$t_1 \sim t_2$时间段N等分，形成Δt_1，Δt_2，…，Δt_N N个等间隔时段，则每时段的负荷概率为 $k_p = \frac{1}{N} \times 100\%$ 且 $\sum_{l=1}^{N} k_p = 100\%$，计算每个负荷概率下对应的负荷功率均值$P_{\Delta t_1}$，$P_{\Delta t_2}$，…，$P_{\Delta t_N}$，形成具有$N$个负荷概率的能详细反映抽油机动态特性的负荷状态表。若整个电网所有抽油机$t_1 \sim t_2$时间段内负荷概率及对应功率均被录入负荷状态表中，则负荷状态表可反映整个油田配电网的动态特性。

2. 基于抽油机负荷概率的动态优化数学模型

根据创建的负荷状态表，建立基于抽油机负荷概率的动态优化数学模型，综合考虑年度降损、电容器投资费用和电压违规虚构惩罚成本，在满足电网安全运行指标条件下，找到经济指标的最佳点。

（1）目标函数

目标函数为

$$\min f = \sum_{l=1}^{N} k_p p_e P_{Ll} + \sum_{i=1}^{N_C} k_{Q_{Ci}} Q_{Ci} + k_u \sum_{j=1}^{N_d} (U_j - U_0) \quad (1)$$

式中，N为负荷概率的个数；p_e为当前电价；P_{Ll}为补偿后第l个负荷概率下年度有功网损；N_C为候选补偿点个数；$k_{Q_{Ci}}$为容量为Q_{Ci}的电容器的年投资费用系数；N_d为馈线节点个数；U_j为馈线节点j补偿后的电压；U_0为馈线节点j的额定电压；k_u为电压越界罚因子。

（2）约束条件

电网的安全运行必须满足功率平衡方程，即满足等式约束

$$\begin{cases} P_i - U_i \sum_{j=1}^{N_d} U_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) = 0 \\ Q_i - U_i \sum_{j=1}^{N_d} U_j (G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中，P_i、Q_i为节点i注入的有功功率和无功功率；G_{ij}为节点i和j之间电导；B_{ij}为节点i和j之间电纳；θ_{ij}为节点i和j之间电压相角差。

优化模型中的各变量在优化过程中也需满足相应的电网安全运行指标。变量约束包括控制变量Q_{Ci}和状态变量U_i的不等式约束

$$\begin{cases} U_{\min} < U_i < U_{\max} \\ Q_{C\min} < Q_{Ci} < Q_{C\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中，$U_{\min}$和$U_{\max}$为节点电压上下限；$Q_{C\min}$和$Q_{C\max}$为电容器容量上下限。

考虑抽油机动态负荷特性的油田配电网高压无功补偿优化模型的求解

1. 基于灵敏度分析的电容器最优安装位置的确定

在所有负荷概率下，通过评估任一高压配电网馈线节点j注入无功对总成本（网络有功损耗＋电压违规）的影响程度来确定“最佳”补偿馈线。则灵敏度为

$$\frac{\partial f_j}{\partial Q_j} = \frac{\sum_{l=1}^{N} k_p p_e P_{Ll} + k_u \sum_{j=1}^{N_d} (U_j - U_0)}{\partial Q_j} \quad (4)$$

式中，第l个负荷概率下系统网损P_{Ll}与节点j注入无功极坐标可表示为

$$\begin{aligned} P_{Ll} &= \sum_{j=1}^{N_d} U_j \sum_{k \in j} U_k (G_{jk} \cos\theta_{jk} + B_{jk} \sin\theta_{jk}) \\ Q_j &= \sum_{k \in j} U_j U_k (G_{jk} \sin\theta_{jk} - B_{jk} \cos\theta_{jk}) \end{aligned} \quad (5)$$

计算网络高压馈线节点灵敏度，选取灵敏度最高的点作为电容器安装点[9-10]。

2. 基于差分进化算法的电容器最优补偿容量的确定

差分进化算法[11-13]具有优化结果与初始值的选取无关、需要的控制量较少和易找到全局最优解等优点，现已在电力系统无功优化领域逐渐开始应用。该算法在构造无约束非线性最小化数学模型基础上，利用随机采样个体间的差异来驱动变异操作，父代个体再与变异个体进行交叉操作产生试验个体，最后通过在目标个体和试验个体间的选择操作决定哪个会被保存到下一代群体中。

应用差分进化算法求解上述目标模型步骤如下。

（1）构造基于外点罚函数法的无约束非线性最小化数学模型

外点罚函数法求解有约束非线性优化问题，

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

不但方法简单，计算方便，还具有初始点选择容易等优点，它将目标函数和约束函数构造成带参数的增广目标函数，有约束非线性优化问题即转化为单个的无约束非线性优化问题[14-15]。

对于有约束的非线性最优数学模型

$$\begin{cases}\min\ f(X) & X=[x_1,x_2,\cdots,x_D]\\ h_i(X)=0 & i=1,2,\cdots,m\\ g_j(X)\leqslant 0 & j=1,2,\cdots,n\end{cases} \tag{6}$$

式中，D为空间解的维数。

基于外点罚函数法的增广目标函数可表述为

$$F[X,r^{(k)}]=f(X)+r^{(k)}\{\min[\sum_{j=1}^{n}\{0,g_j(X)\}]^2+\sum_{i=1}^{m}[h_i(X)]^2\} \tag{7}$$

式中，$r^{(k)}$为罚因子，为一个递增无穷序列。判断罚函数项$r^{(k)}\{\min[\sum_{j=1}^{n}\{0,g_j(X)\}]^2+\sum_{i=1}^{m}[h_i(X)]^2\}$的值，若罚函数项值为0，解在可行域之内，增广目标函数的解即为原目标函数的解；否则，解在可行域之外。

（2）初始化操作

随机产生初始种群

$$\{X_i(0)\,|\,X_i(0)=[x_{1,i},x_{2,i},\cdots,x_{D,i}],i=1,2,\cdots,N_{\mathrm{P}}\} \tag{8}$$

式中，$X_i(0)$为初始种群中第i个个体；N_{P}为种群大小。初始种群中个体分量通常是随机产生的，可表示为

$$x_{j,i}=l_j+\mathrm{rand}(0,1)(u_j-l_j)\quad \begin{matrix}j=1,2,\cdots,D\\ i=1,2,\cdots,N_{\mathrm{P}}\end{matrix} \tag{9}$$

式中，rand(0,1)为均匀分布在(0,1)之间的随机数。

（3）变异操作

DE通过差分策略实现变异，它是从当前种群中随机选取两个相异个体，将其相量差缩放后与待变异个体进行相量合成产生变异个体$\boldsymbol{V}_i(g+1)$。变异操作可按下式表示

$$\boldsymbol{V}_i(g+1)=\boldsymbol{X}_{r1}(g)+F[\boldsymbol{X}_{r2}(g)-\boldsymbol{X}_{r3}(g)]\quad i\neq r_1\neq r_2\neq r_3 \tag{10}$$

式中，r_1，r_2，$r_3\in\{1,2,\cdots,N_P\}$为三个随机产生且互不相同的整数；常数F为缩放因子；g为进化代数。

（4）交叉操作

为提高种群的多样性，差分进化算法引入交叉操作。交叉操作将变异操作产生的变异个体$\boldsymbol{V}_i(g+1)$和当代目标个体$\boldsymbol{X}_i(g)$进行交叉，得到$g+1$代试验个体相量$\boldsymbol{U}_i(g+1)=(u_{1,i},u_{2,i},\cdots u_{D,i})$，试验个体相量中第$j$个分量表示为

$$u_{j,i}(g+1)=\begin{cases}v_{j,i}(g+1) & \mathrm{rand}(j)\leqslant \mathrm{CR}\ \text{or}\ j=j_{\mathrm{rand}}\\ x_{j,i}(g) & \text{otherwise}\end{cases} \tag{11}$$

式中，rand(j)为(0,1)内均匀分布的随机数；j_{rand}为区间[1,D]内的随机整数，以保证至少有一维变量由变异相量贡献；CR为交叉概率。

（5）选择操作

DE算法采用一对一的贪婪选择操作，根据式（12）对试验个体和原始个体进行选择，适应度函数值小的个体将作为新一代个体被保留到下一代，即

$$\boldsymbol{X}_{i,G+1}=\begin{cases}\boldsymbol{U}_{i,G+1} & f(\boldsymbol{U}_{i,G+1})\leqslant f(\boldsymbol{X}_{i,G})\\ \boldsymbol{X}_{i,G} & f(\boldsymbol{U}_{i,G+1})>f(\boldsymbol{X}_{i,G})\end{cases} \tag{12}$$

（6）终止条件

当迭代次数g超过了最大迭代次数G_{m}或者求解准确度达到要求时，停止搜索。

利用差分进化算法求解油田配电网高压无功优化流程图如图2所示。

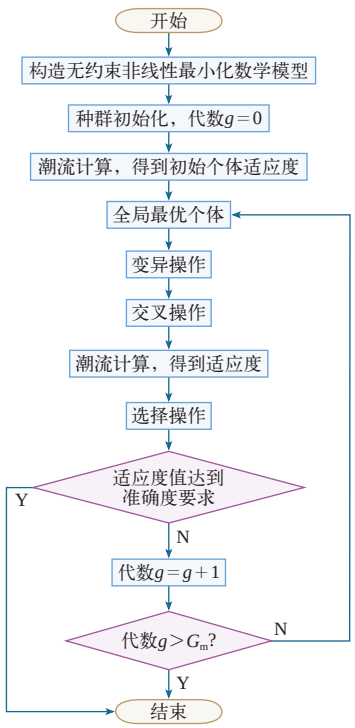

图2 差分进化算法流程图

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

考虑到新增补偿设备对电网的影响，该算法在上一台电容器设备安装完毕后重新计算灵敏度最优点作为下一个电容器安装点，然后再计算该点最优安装容量，以此类推。当该算法停止所有馈线节点电容器安装时，并联电容器补偿不能进一步降低网络成本。

仿真应用

1. 仿真模型

为验证基于抽油机负荷概率的动态无功优化数学模型的可行性，本文以某油田河50甲线油田实际配电网为例进行仿真验证，并将本文所提出的优化方法与油田电网传统的基于负荷等额分配的静态无功优化方法的仿真结果作对比分析。图3为某油田河50甲线电网模型单线图。

对网络模型进行仿真计算，创建抽油机负荷状态表。

2. 动态无功优化与传统静态无功优化结果对比

对河50甲线网络模型采用本文所提出的考虑负荷动态特性的无功优化方法和传统的静态无功优化方法分别进行仿真计算，无功补偿方案如表1所示。

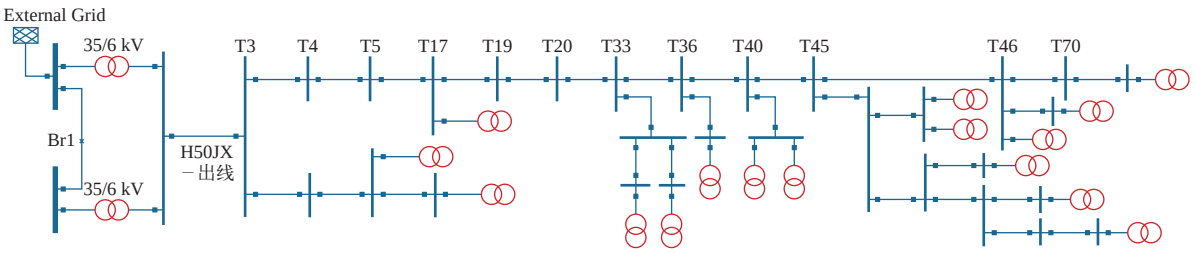

图3 河50甲线电网单线图

表1 无功补偿优化方案

方案	补偿位置	补偿容量/Mvar
传统的静态无功优化	T70	0.344
	T40	0.205
	T17	0.109
	T3	0.271
考虑负荷动态特性的无功优化	T45	0.371
	T36	0.221
	T20	0.049
	T3	0.271

按上述两种无功优化方案对河50甲线网络模型进行优化仿真，模型节点电压对比结果如图4所示，有功网损对比结果如图5和表2所示。

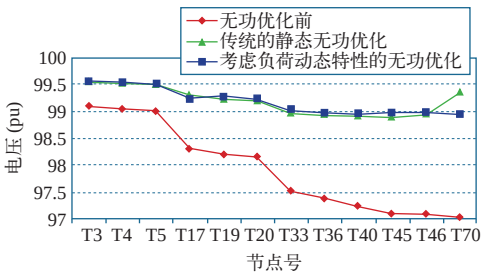

图4 节点电压对比图

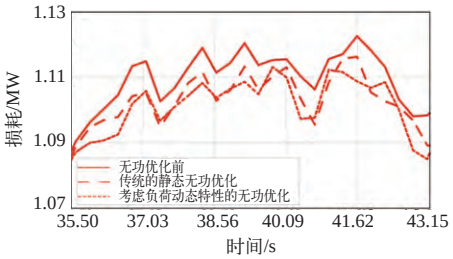

图5 有功损耗局部对比图

表2 有功损耗结果对比

方案	有功损耗/kW
无功优化前	1 113.382
传统的静态无功优化	1 106.606
考虑负荷动态特性的无功优化	1 105.121

由图4曲线可以看出，按两种无功优化方案补偿后各节点的节点电压幅值均比优化前有所提高；考虑负荷动态特性的无功优化比传统静态无功优化节点电压曲线整体稍高且走势平稳。结合图5以及表2可知，按两种无功优化方案补偿后系统有功损耗比优化前均明显下降；传统的静态无功优化补偿后网损较优化前降低约6.776 kW，考虑负荷动态特性的无功优化补偿后网损较优化前降

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

低约8.261 kW，网损降低量同比增加约21.916%。由此可见，考虑负荷动态特性的无功优化较传统的静态无功优化效果更好。考虑负荷动态特性的无功优化补偿后，河50甲线每年因降低网损节省电量约72 366.360 kW·h，按电价0.75 元/kW·h计算，每年节省电费约54 274.77 元，对油田电网的经济运行大有裨益。

结束语

本文根据油田抽油机周期性交变的载荷特点，利用抽油机负荷概率，提出一种考虑负荷动态特性的油田配电网高压无功补偿优化方法。该方法摒弃了传统油田电网将抽油机视为单一静态负荷来对高压配电网进行无功优化补偿的做法，能较好地反映油田高压配电网的动态负荷特性。在该方法基础上建立了与油田经济效益相结合的无功优化数学模型，利用目标灵敏度分析和在电力系统无功优化领域应用较少的差分进化算法对模型进行求解。最后，搭建某油田河50甲线电网模型，采用本文提出的无功优化方法和传统的静态无功优化方法对模型分别进行无功优化仿真计算，通过优化结果的对比分析，验证了该方法的有效性。

利用本文提出的考虑负荷动态特性的油田配电网高压无功优化方法在某油田河50甲线实际配网中应用良好，该方法对于负荷特性变化较为剧烈的其他配电网来说具有广阔的发展空间与应用价值。

参考文献

[1] 张程，王主丁，张宗益，等．多负荷水平下配电网电容器优化配置算法 [J]．电网技术，2010，34 (12)：85-89．

[2] 张博，杨作鹏，张瑞，等．电气规则制约的配电网电容器优化配置 [J]．电气应用，2009，28 (1)：18-22．

[3] 王天施，吴云，韩晓光．油田配电网无功优化补偿的研究 [J]．低压电器，2009 (15)：41-43．

[4] 马昭祥．油田配电网无功优化补偿的研究 [J]．东北电力技术，2010 (4)：22-24．

[5] 王佳贤，程浩忠，胡泽春．多负荷水平下的配电网无功优化规划方法 [J]．电网技术，2008，32 (19)：56-61．

[6] 张玉泉，张小军，蔺旭峰，等．抽油机节能的方法及采用动态无功补偿的研究 [J]．低压电器，2012 (1)：18-22．

[7] 杨鑫．油田电网节能无功动态补偿技术的应用 [J]．石油石化节能，2013 (8)：19-20．

[8] 陈拓新．智能配电网无功补偿电容器组优化配置研究 [D]．北京：华北电力大学，2012．

[9] 马进，王景钢，贺仁睦．电力系统动态仿真的灵敏度分析 [J]．电力系统自动化，2005，29 (17)：20-27．

[10] 余健明，杜刚，姚李孝．结合灵敏度分析的遗传算法应用于配电网无功补偿优化规划 [J]．电网技术，2002，26 (7)：46-49．

[11] 康忠健，訾淑伟．基于差分进化算法的油田区域配电网无功优化技术的研究 [J]．电工技术学报，2013，28 (16)：226-231．

[12] 呼忠权．差分进化算法的优化及其应用研究 [D]．秦皇岛：燕山大学，2013．

[13] 袁晓辉，苏安浚，聂浩，等．差分进化算法在电力系统中的应用研究进展 [J]．华东电力，2009，37 (2)：243-248．

[14] 王兴华．惩罚函数法的改进算法及应用研究 [D]．秦皇岛：燕山大学，2009．

[15] 魏大松．关于非线性优化问题的算法研究 [D]．重庆：重庆大学，2007．

（收稿日期：2015－03－10）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net