

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.06.015

# 油田配电网节能降损投资决策方法

王富<sup>1</sup>, 杨威<sup>1</sup>, 张安安<sup>1</sup>, 邹羽施<sup>1</sup>, 刘宁<sup>2</sup>

(1. 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500;

2. 克拉玛依市水务有限责任公司, 新疆维吾尔自治区 克拉玛依 834000)

**摘要:**为满足油田配电网提质增效的发展需求,助力低碳目标的实现,提出油田配电网节能技措优化投资决策方法。首先,在分析油田配电网典型负荷功率特征的基础上,提出以抽油机负荷叠加特性为主的油田配电网损耗计算模型;其次,结合不同节能技措的节电量数学模型和油田电量灰色预测GM(1,1)模型,建立规划期油田配电网节能技措优化投资决策模型;然后,基于油田节能技措特点选取降损组合优选方案,并根据油田规模自适应选取直接枚举比较法与禁忌搜索法进行求解;最后,以某油田30节点6 kV配电网线路为例进行仿真验证。结果表明:由文中投资决策方法得到的油田配电网节能降损方案具有较高性价比,能够有效提高线路末端电压。

**关键词:**油田配电网;投资决策;节能技措;灰色预测;负荷特性;禁忌搜索

中图分类号:TM743

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)06-0125-09

## 0 引言

为促进节能减排,国家相继出台了《“十四五”节能减排综合工作方案》等一系列政策文件,油田企业也作出提质增效战略部署。调查显示,我国大部分油田电网功率因数合格率严重不达标,如某油田37条石油专线中的11条线路功率因数低,导致能耗加重,碳排放过量,油田企业经济投入增加<sup>[1]</sup>,因此寻找经济可行的节能降耗措施刻不容缓。

配电网节能降损措施众多<sup>[2-8]</sup>,但大部分因对象不同导致节能效果差异较大,而针对油田配电网的节能效果计算模型大都只考虑了功率因数等部分影响因素<sup>[9-11]</sup>,模型的计算精度不高。此外,节能技措相关的标准规范只给出指导性意见,未给出针对不同节能技措的节电量具体计算方法。文献[12]基于配电网微观和宏观两方面考虑,建立节能改造投资规划模型,对不同节能技措效果进行评估,但没有涉及到具体节能改造措施,缺乏普适性。文献[13]基于多层次模糊法从节能效果、电网可靠性和经济性3个角度对配电网进行分析,系统性挖掘单一节能技措的节能改造潜力,但不同节能技措之间相互影响,无法保证最终结果的准确性。文献[14]考虑低压配电网台区评估过程简单、评估指标不完善的问题,提出考虑沿线电压特性的电压评估指标及相应的电压改善潜力定量评估方法,但仅从电压质量角度对节能技措效果进行评估。文献

[15]考虑环境因素,建立基于低碳效益的配电网降损方案组合最优选择模型,但未考虑工业负荷力率收费等其他经济因素的影响。此外,现有文献缺乏针对油田配电网节能技措投资决策的相关报道。

针对以上问题,文中基于油田配电系统负荷特性分析,提出一种以抽油机负荷叠加特性为主的油田配电网特殊线损计算模型,并根据油田现实负荷进行校正。为评估各种降损方案的效果,建立不同节能技措的节电量数学模型,通过油田电量灰色预测GM(1,1)模型研究,建立考虑油田实际情况的规划期降损方案组合优化投资决策模型。最后因油田规模的不同分别选取直接枚举比较法与禁忌搜索法求解模型,得到降损投资性价比较高的规划方案,为油田降本增效建设提供支持。

## 1 油田电网特性及损耗分析

### 1.1 油田配电网特性

油田配电网主要包含6 kV或10 kV母线、配电线路、配电变压器、380 V电力传输线路以及不同类型负荷。油田配电网负荷主要包括电机类负荷(油井抽油机、油井注水泵、潜油电泵等)以及其他类型负荷(普通照明灯、电弧炉、抽油机专用变频器等),其结构如图1所示。

油田配电网系统主要特点如下:(1)复杂度高,油田电网的配电线路节点数目众多,负荷类型多样;(2)效率低,油田变压器的容量利用率较低,大多处于“大马拉小车”状态;(3)供电质量差,部分线路供电半径过长,且抽油机均为上下冲程运行,负载急剧变化可能导致电网电压出现剧烈波动。

收稿日期:2021-10-12;修回日期:2022-02-10

基金项目:四川省科技计划资助项目(2019YJ0279,2020YF-SY0038)

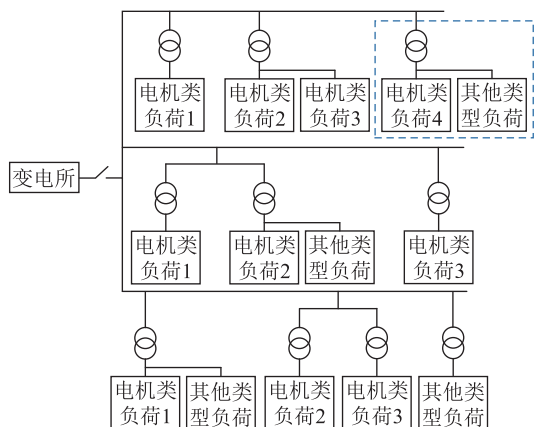


图1 油田配电网结构

Fig.1 Structure of oilfield distribution network

### 1.2 以抽油机为主的油田配电网损耗计算模型

油田配电网负荷以抽油机和油井注水泵为主<sup>[1]</sup>。第*i*台变压器所在支路电量总损耗计算边界为图1中蓝色虚线边框区域。

分析工作特性可知,油井注水泵和普通照明类等其他负荷均可视为恒定不变负荷。而抽油机为波动性负荷,其采油杆上下冲程消耗功率,抽油机的有功功率变化趋势可近似看作正弦曲线<sup>[16]</sup>,则第*i*台变压器下第*j*台抽油机所在支路的有功功率 $P_j(t)$ 可表示为:

$$P_j(t) = P_{avj}(1 + \sin(\omega(t) + \theta_j)) \quad (1)$$

式中: $P_{avj}$ 为第*j*台抽油机的平均有功功率幅值; $\omega(t)$ 为*t*时刻第*j*台抽油机的角频率; $\theta_j$ 为第*j*台抽油机的初始相位。

对于相同区域内的抽油机负荷,若多个正处于工作中的抽油机所连为同一个变压器,则可视为抽油机工作状态一致,上下冲程功率损耗相同。通过积分法进行简化,可得到某一时间段内的支路总损耗,则具有多台抽油机的第*i*台变压器所带抽油机负荷损耗电量 $E_i$ 可表示为:

$$E_i = \frac{R_i t}{U^2} \left( \frac{3}{2} P_i^2 + Q_i^2 \right) \quad (2)$$

式中: $P_i$ 为第*i*台变压器所带所有抽油机的有功功率的叠加等效值; $Q_i$ 为第*i*台变压器所带所有抽油机的无功功率的叠加等效值; $U$ 为运行电压; $t$ 为抽油机运行时间; $R_i$ 为第*i*台变压器所在支路电阻。

根据油田负荷分布特点,第*i*台变压器所在支路的负荷损耗电量可进一步表示为:

$$E_{iL} = \frac{R_i t}{U^2} (1.3 P_{iall}^2 + Q_{iall}^2) \quad (3)$$

式中: $P_{iall}$ ,  $Q_{iall}$ 分别为第*i*台变压器所带所有电机类负荷及其他类型负荷有功、无功功率的叠加等效值。

第*i*台变压器自身电量损耗可表示为:

$$E_{iT} = P_{i0} t + \frac{R_{iT} t}{U^2} (P_i^2 + Q_i^2) \quad (4)$$

$$R_{iT} = \frac{P_{ik} U^2}{S_{ie}^2} \quad (5)$$

式中: $P_{i0}$ 为第*i*台变压器空载有功损耗; $R_{iT}$ 为第*i*台变压器等值电阻; $P_{ik}$ 为第*i*台变压器短路有功损耗; $S_{ie}$ 为第*i*台变压器额定容量。

第*i*台变压器所在支路总损耗 $E$ 为油田负荷的理论电量损耗与变压器的理论电量损耗之和,即:

$$E = E_{iL} + E_{iT} \quad (6)$$

### 1.3 油田电量灰色预测模型

为寻找油田电力负荷变化和多种因素之间的内在规律,对不同节能技措的节能潜力进行预测和评估,须建立油田电量预测模型。由于多元线性回归预测方法和深度学习模型等需要大量数据,不符合油田现状,因此文中采用灰色预测GM(1,1)模型法<sup>[17-19]</sup>实现油田电量预测。

GM(1,1)模型本质是对原序列进行处理,然后建立微分方程模型进行预测,模型中存在的未知变量采用最小二乘法进行求解,最后将累加后获取的值替换为原始预测值。假设原始时间序列为:

$$X_{(0)} = \{x_{1(0)}, x_{2(0)}, \dots, x_{n(0)}\} \quad (7)$$

式中: $x_{i(0)} > 0, i = 1, 2, \dots, n$ 。

将式(7)进行一次累加求和得到序列为:

$$X_{(1)} = \left\{ x_{1(0)}, x_{1(0)} + x_{2(0)}, \dots, \sum_{i=1}^n x_{i(0)} \right\} = \{x_{1(1)}, x_{2(1)}, \dots, x_{n(1)}\} \quad (8)$$

式中: $x_{k(1)} = \sum_{i=1}^k x_{i(0)}, k = 1, 2, \dots, n$ 。

再通过白化处理,建立白化方程:

$$\frac{dX_{(1)}}{dt} + aX_{(1)} = u \quad (9)$$

求解式(9)得预测模型:

$$\hat{x}_{k+1(1)} = \left( x_{1(0)} - \frac{u}{a} \right) e^{-au} + \frac{u}{a} \quad (10)$$

式中: $a$ 为发展系数; $u$ 为灰作用量。求解如下:

$$\begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T [x_{2(0)} \quad x_{3(0)} \quad \dots \quad x_{n(0)}]^T \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(x_{1(1)} + x_{2(1)}) & 1 \\ \frac{1}{2}(x_{2(1)} + x_{3(1)}) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{1}{2}(x_{n-1(1)} + x_{n(1)}) & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

将式(11)、式(12)代入式(10)求得 $\hat{x}_{k+1(1)}$ ,再根据式(13)得到 $\hat{x}_{k+1(0)}$ 的预测值,即:

$$\hat{x}_{k+1(0)} = \hat{x}_{k+1(1)} - \hat{x}_{k(1)} \quad (13)$$

油田电量灰色预测模型精度的检验采用以下标准。(1)原始序列的平均值,可表示为:

$$\bar{x}_{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i(0)} \quad (14)$$

(2)残差的方均值,可表示为:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{i(0)} \quad (15)$$

式中: $\delta_{i(0)} = x_{i(0)} - \hat{x}_{i(0)}$ 。

(3)方差比,可表示为:

$$C = \frac{(n-1) \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i(0)} - \bar{x}_{(0)})^2}}{\sum_{i=1}^n (\delta_{i(0)} - \bar{\delta})^2} \quad (16)$$

(4)小残差概率,可表示为:

$$P = \left\{ \left| \delta_{i(0)} - \bar{\delta} \right| < 0.6745 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i(0)} - \bar{x}_{(0)})^2} \right\} \quad (17)$$

考虑油田配电网负荷数据的特殊性,小残差概率和方差比检验合格即可,即满足 $P > 0.8, C < 0.5$ 时可采用所建模型进行预测,否则须进行残差修正。

## 2 油田配电网节电量计算模型

油田配电网网络损耗的主要影响因素包括系统运行电压、功率因数、负荷分布情况及元件参数等,各类节能措施通过改变上述影响因素实现配电网的节能降耗。

### 2.1 主干线路改造

由于油田“滚动开发”的发展模式,前期供电线路建设标准无法满足后续要求,易导致供电线路过长等问题,不断增加线路损耗,主干线路改造(更换大截面导线)可有效降损。主干线路改造节电量计算如下:

$$\Delta E_L = \left[ \left( \frac{P_{\max}}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi} \right)^2 R - \left( \frac{P'_{\max}}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi'} \right)^2 R' \right] T \quad (18)$$

式中: $U_N$ 为额定电压; $P_{\max}, P'_{\max}$ 分别为线路改造前、后最大功率; $R, R'$ 分别为线路改造前、后导线电阻; $\cos \varphi, \cos \varphi'$ 分别为线路改造前、后功率因数; $T$ 为负荷运行时间。

### 2.2 高损耗变压器改造

油田配电网抽油机数量较多,所连接的变压器数量也随之增加。电能由油田电网传输的过程中,

大多数变压器容量利用率低,导致损耗加大,因此根据油田地面建设标准,选用高效率、低能耗的新型节能变压器(S9及其以下系列的高损耗变压器更换为S11、S13、SH15系列)成为油田电网节能降损的重点。高损耗变压器改造节电量计算如下:

$$\Delta E_T = \left[ P_0 - P'_0 + \left( \frac{P_k}{S_e^2} - \frac{P'_k}{S'_e{}^2} \right) (P_i'^2 + Q_i'^2) \right] T \quad (19)$$

式中: $P_0, P_k$ 分别为改造前原配电变压器的空载损耗和短路损耗; $P'_0, P'_k$ 分别为改造后节能变压器的空载损耗和短路损耗; $S_e, S'_e$ 分别为变压器更换前、后额定容量; $P'_i, Q'_i$ 分别为第*i*台变压器改造后的有功功率和无功功率。

### 2.3 加装无功补偿装置

为了使配电网出线侧功率因数满足要求(不低于0.9),须加装无功补偿装置。无功补偿装置安装组数越多,降损效果越明显,但增加单位补偿容量的无功线损下降率会减少,因此须选用合适的无功补偿方式。油田配电网的无功补偿方式主要包括变电所集中补偿、配电线路集中补偿以及抽油机随机就地补偿等,如图2蓝色虚线方框所示。

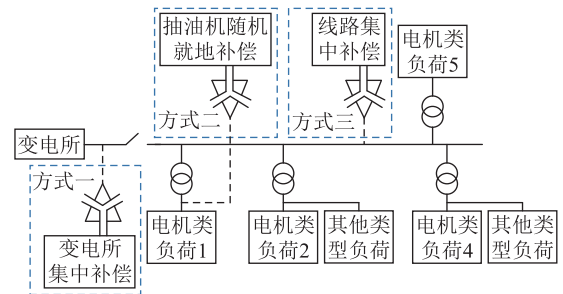


图2 油田配电网无功补偿配置方案

Fig.2 Reactive power compensation configuration schemes of oilfield distribution network

(1)变电所集中补偿。通过补偿变电所出线侧输电线路和主变压器的无功功率,改善输电线路的无功流动,提高变电所出线侧的母线电压,从而减少配电网系统损耗。

(2)配电线路集中补偿。一般是在配电线路的主干线集中装设无功补偿装置,集中补偿安装最佳位置随安装组数的不同而有所差异。

(3)抽油机就地补偿。感应电动机作为抽油机的主要组成部分,是消耗无功功率最多的用电设备,故对于油田企业实施抽油机就地无功补偿是一种减少电能损耗,同时提升电能质量的重要方式。

无功补偿装置节电量可通过式(1)~式(6)进一步求得,可表示为:

$$\Delta E = \Delta E_{n,L} + \Delta E_{k,L} + \Delta E_{k,T} \quad (20)$$



式中: $\Delta E_{n,l}$ 为  $n$  条主干线路总节电量; $\Delta E_{k,l}$ 为  $k$  台变压器各所在支路的负荷总节电量; $\Delta E_{k,T}$ 为  $k$  台变压器各所在支路的变压器总节电量。

主干线路总节电量可表示为:

$$\Delta E_{n,l} = \sum_{m=1}^n \left[ \left( \frac{P_{av,m} k_{L,m}}{U_{N,m} \cos \varphi_m} \right)^2 R_{L,m} - \left( \frac{P'_{av,m} k_{L,m}}{U_{N,m} \cos \varphi'_m} \right)^2 R'_{L,m} \right] T \quad (21)$$

式中: $P_{av,m}, P'_{av,m}$ 分别为项目改造前、后第  $m$  条主干线路的平均功率; $R_{L,m}, R'_{L,m}$ 分别为项目改造前、后第  $m$  条主干线路电阻; $U_{N,m}$ 为第  $m$  条主干线路额定电压; $\cos \varphi_m, \cos \varphi'_m$ 分别为项目改造前、后第  $m$  条主干线路功率因数; $k_{L,m}$ 为项目改造后第  $m$  条主干线路功率均方根与平均值的折合系数; $T$ 为补偿装置运行时间。

负荷总节电量可表示为:

$$\Delta E_{k,l} = \sum_{i=1}^k \left( \frac{1.3P_{iall}^2 + Q_{iall}^2}{U_i^2} - \frac{1.3P'_{iall}^2 + Q'_{iall}^2}{U'_i{}^2} \right) R_i T \quad (22)$$

式中: $P'_{iall}, Q'_{iall}$ 分别为项目改造后第  $i$  台变压器所带所有负荷有功功率和无功功率的叠加等效值; $U_i, U'_i$ 分别为项目改造前、后第  $i$  台变压器电压。

变压器总节电量可表示为:

$$\Delta E_{k,T} = \sum_{i=1}^k (P_{i0} - P'_{i0}) T + \left[ \left( \frac{P_{av,i} k_{T,i}}{S_{e,i} \cos \varphi_i} \right)^2 P_{k,i} - \left( \frac{P'_{av,i} k_{T,i}}{S'_{e,i} \cos \varphi'_i} \right)^2 P'_{k,i} \right] T \quad (23)$$

式中: $P_{i0}, P'_{i0}$ 分别为项目改造前、后第  $i$  台变压器空载损耗; $P_{k,i}, P'_{k,i}$ 分别为项目改造前、后第  $i$  台变压器负载损耗; $S_{e,i}, S'_{e,i}$ 分别为项目改造前、后第  $i$  台变压器额定容量; $P_{av,i}, P'_{av,i}$ 分别为项目改造前、后第  $i$  个变压器的平均有功功率; $\cos \varphi_i, \cos \varphi'_i$ 分别为项目改造前、后第  $i$  个变压器的功率因数; $k_{T,i}$ 为项目改造后第  $i$  个变压器功率均方根与平均值的折合系数。

### 2.4 油田节能技措方案筛选

上述节能降损方案均能起到降低配电网损耗的作用,但是侧重点不同并各有利弊。文中对油田配电网节能技措进行实用性分析,考虑不同节能技措组合的综合投资效益,最终选取的节能技措包括:(1) 线路改造;(2) 变压器改造;(3) 变电所集中补偿;(4) 线路集中补偿;(5) 抽油机随机补偿。

## 3 节能技措优化投资模型

### 3.1 目标函数

文中以规划期总收益最大为目标函数进行节能技措方案选择。规划期总收益可表示为:

$$Z = \sum_{t=1}^y C_t - g \quad (24)$$

式中: $y$ 为规划期目标年份; $C_t$ 为第  $t$  年的节电费,包括直接降损费用与间接降损费用(力率电费、碳排放罚金等); $g$ 为节能降损措施的综合成本(包括老旧设备的拆除,新设备的购买、安装、运行维护等综合投资费用),其计算见式(25)。

$$g = \sum_{l=1}^N \left[ m_{B,l} + m_{D,l} + \sum_{t=1}^y \frac{m_{O,t,l}}{(1+r)^{t-1}} \right] \quad (25)$$

式中: $N$ 为设备总数量; $m_{B,l}$ 为第  $l$  种设备的购置及安装成本; $m_{D,l}$ 为第  $l$  种旧设备的拆除成本; $m_{O,t,l}$ 为第  $t$  年第  $l$  种设备的运行维护成本; $r$ 为折现率(电力项目采用的折现率主要为 5%~10%,文中参考实际情况取 7%)。

年节电费可表示为:

$$\begin{cases} C_t = C_{e,t} + C_{p,t} + C_{n,t} \\ C_{e,t} = \Delta E c \\ C_{p,t} = P_t (l_{q,t} - l_{h,t}) \times 8760 \times c \\ C_{n,t} = \frac{C_{e,t} \rho p d}{q \eta} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $C_{e,t}$ 为第  $t$  年降低的损耗电费; $C_{p,t}$ 为第  $t$  年降低的力率电费; $C_{n,t}$ 为第  $t$  年降低的碳排放罚金; $c$ 为标准电价; $P_t$ 为第  $t$  年的有功功率; $l_{q,t}$ 为第  $t$  年补偿前的力率指标; $l_{h,t}$ 为补偿后的力率指标; $\rho$ 为火电比重; $p$ 为单位燃料的碳排放量; $d$ 为碳价; $q$ 为单位燃料的发热量; $\eta$ 为电源的能量转换率。

增收力率费用是因为电网对工业用户功率因数的考核标准是 0.9,具体比例可参考文献[18]。

### 3.2 约束条件

(1) 电压偏差。

$$\Delta U = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (27)$$

按国家标准 6 kV 电压等级,允许电压偏差约束为:

$$-10\% \leq \Delta U \leq 5\% \quad (28)$$

0.4 kV 电压等级允许电压偏差约束为:

$$-7\% \leq \Delta U \leq 7\% \quad (29)$$

(2) 分支电流约束。

$$I_v < I_{vmax} \quad (30)$$

式中: $I_v$ 为运行时各支路的电流值; $I_{vmax}$ 为各支路允

许通过的最大电流值。

$$(3) \text{ 年限约束。} \\ y \leq Y \quad (31)$$

式中:  $Y$  为规划期上限。

$$(4) \text{ 改造投资限制约束。} \\ g \leq G \quad (32)$$

式中:  $G$  为总投资上限。

### 3.3 方案优选策略

为了得到投资决策最优的油田配电网节能技措组合方案,文中提出了考虑多方面的投资决策模型,流程如图3所示。

根据配电网规模大小选取不同的优选方法。规模较小时,采用直接枚举比较法产生优选方案;规模较大时,为减少多种规划方案枚举及比较产生的大量计算,采用禁忌搜索算法<sup>[20]</sup>进行方案优选。

禁忌搜索算法求解油田配电网节能技措投资决策优化模型时,其实现步骤如下。

第一步:在调查、分析不同油田区域信息的基础上,生成不同节能技措组合方案。

第二步:确定初始组合方案总数,给定并输入算法参数,置禁忌表  $T_L = \emptyset$ 。

第三步:选定一个初始解  $x_{best} = x_{now1}$ ,并将初始规划方案列入禁忌表中。

第四步:在  $x_{now}$  邻域中选取多种方案  $N(x_{now})$ ,某种相邻方案与上一方案只存在一个影响因素发生改变,并且不能将已存于禁忌表的方案作为选取方案。

第五步:把不同约束条件代入各相邻方案,确定相邻方案在约束条件内。若相邻方案不在约束条件内,则需要把惩罚值送入目标函数。

第六步:得到各相邻方案的目标函数,因目标为规划期总收益最大,所以若当前方案目标函数小于新目标函数,则最优方案被替换为  $x_{best} = x_{now*}$ 。

第七步:若满足终止条件则输出最终计算结果,得到最佳油田节能技措降耗投资方案,否则转第四步。

## 4 算例仿真

以某油田 6 kV 30 节点配电网为例,通过 Matlab 软件平台以及油田实际数据实现整条配电网的潮流计算,与文中提出的油田配电网电量损耗计算公式进行对比仿真验证。根据已有的油田历史数据,建立灰色 GM(1,1)模型,预测 2021 年—2030 年的油田电量,再根据油田实用性分析筛选出节能技措组合,以直接对比法与禁忌搜索法分别求解投资决策函数,通过约束条件的验证找到最适宜的节

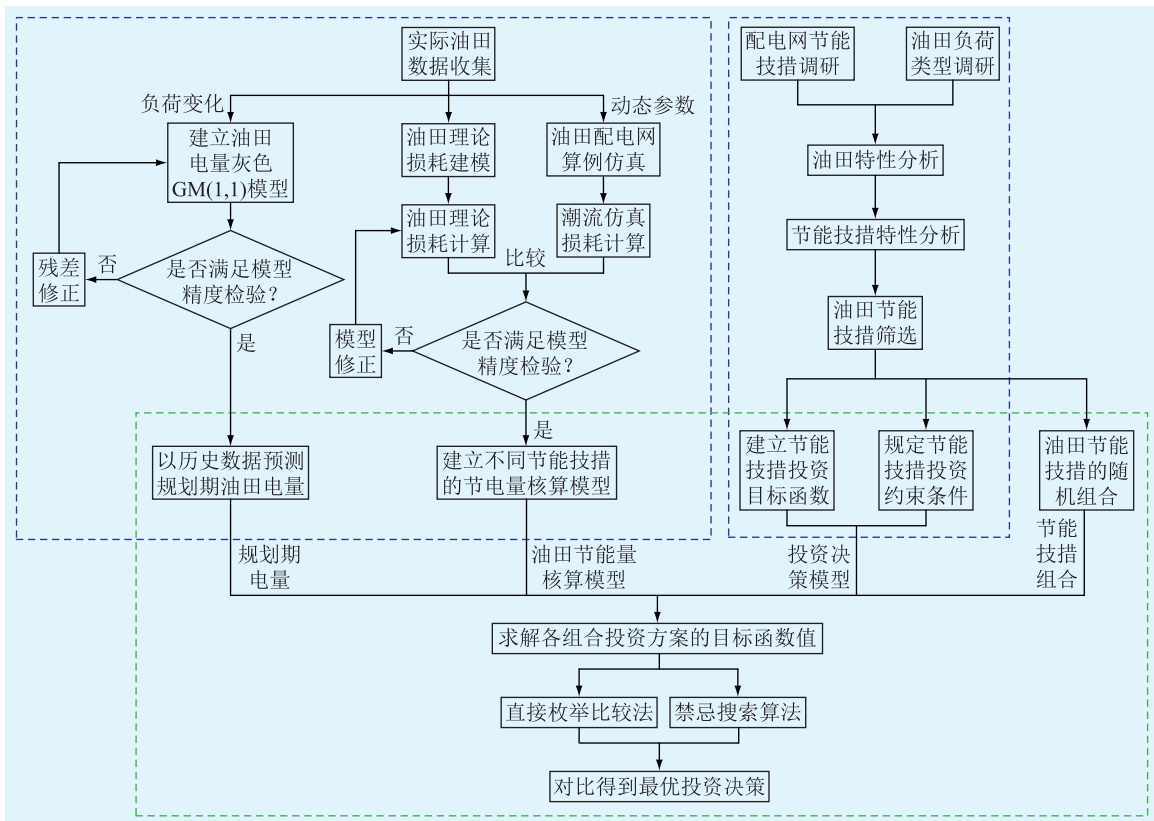


图3 油田配电网最优投资决策流程

Fig.3 Flow chart of optimal investment decision of oilfield distribution network

能技措组合方案。

### 4.1 参数设置

油田未采取任何节能技措时,配电网实际有功功率为 1 179.2 kW,功率因数为 78.51%,有功损耗为 56.77 kW,末端电压为 5.97 kV,节能改造投资预算为 250 万元,规划期为 10 a。其接线如图 4 所示。

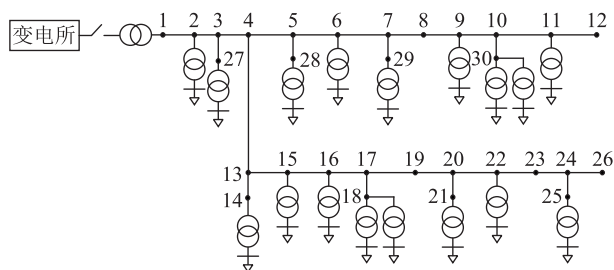


图 4 油田配电网接线

Fig.4 Wiring of oilfield distribution network

油田线路全长 13.95 km,型号均为 LGJ95,现更换为 LGJ120,市场价格为 11 万元/km,拆除、安装等系列措施所需花费按一般情况统一计算为购买价格的 20%。根据油田配网实际情况,考虑价格、性能等因素限制,将变压器 S7、S9 系列统一更换为 S11 系列,因容量不同购买费用不同<sup>[15]</sup>,拆除、安装等系列措施所需花费按一般情况统一计算为购买价格的 25%<sup>[21-22]</sup>。

除特殊天气外,油田电网一般不会关闭自动补偿装置,取年运行小时数 7 500 h,设备年运行维护费用根据补偿方式的不同取值改变<sup>[19]</sup>。为了方便比较各补偿措施的优劣性,各无功补偿措施的总补偿容量均取 400 kvar。

### 4.2 理论线损分析及负荷预测

由于油田配电网的实际负荷特性,往往统计的是其最大负荷情况,所测电量为 1 h 的电量,油田配电网支路负荷损耗通过式(6)计算,理论线损分析结果如表 1 所示。

表 1 理论线损分析结果比较

Table 1 Comparison of theoretical line loss analysis results

数值来源	有功损耗 电量/(kW·h)	无功损耗 电量/(kvar·h)	有功损耗率/%
实际测量	56.77	81.48	4.81
文中方法	54.15	77.89	4.47
潮流计算	49.21	72.14	4.05

仿真结果表明,文中方法测得的有功损耗与实际测得的有功损耗误差较小,证明了文中负荷损耗模型用于油田配电网线损计算的有效性。

负荷预测采用灰色预测法,预测模型的结果检

验方差比  $C$  为 0.445 1,小残差概率  $P$  为 0.843 4。综上,模型精度检验合格,可用于油田电量负荷预测,满足规划期投资决策模型需要。

### 4.3 投资决策分析

根据该油田配电网实际情况,选取以下几种方案组合实现降损。

(1) 方案  $G_1$ :主干线路改造,主线路部分由 LGJ95 更换为 LGJ120。

(2) 方案  $G_2$ :高损耗变压器改造,变压器 S7、S9 系列统一更换为 S11 系列。

(3) 方案  $G_3$ :变电所集中补偿,设备年运行维护费用为 5%。

(4) 方案  $G_4$ :线路集中无功补偿,设备年运行维护费用为 10%。

(5) 方案  $G_5$ :抽油机就地补偿,设备年运行维护费用为 15%。

为比较单一技措和组合技措的区别,对 5 种方案进行随机组合得到方案集  $X(G_5, G_4, G_3, G_2, G_1)$ ,排除掉  $G_3$ 、 $G_4$  和  $G_5$  这 3 种补偿方式的冲突性,剩余的组方式 15 种,如表 2 所示。表中 0 表示该技措未实施,1 表示实施。

表 2 油田节能技措组合方案

Table 2 Combination schemes of oilfield energy-saving technology

方案编号	$G_5$	$G_4$	$G_3$	$G_2$	$G_1$
1	0	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0
3	0	0	0	1	1
4	0	0	1	0	0
5	0	0	1	0	1
6	0	0	1	1	0
7	0	0	1	1	1
8	0	1	0	0	0
9	0	1	0	0	1
10	0	1	0	1	0
11	0	1	0	1	1
12	1	0	0	0	0
13	1	0	0	0	1
14	1	0	0	1	0
15	1	0	0	1	1

各投资降损组合方案的规划期碳减排量和节电量如图 5 所示,投资收益结果如表 3 所示(油田电网平段电价在 0.53 元/(kW·h)浮动,无功补偿总投资按 10 a 无功补偿总容量统计)。

由图 5 和表 3 可以看出,方案 8 单独进行线路集中无功补偿( $G_4$ )可使规划期收益达到最大,收益

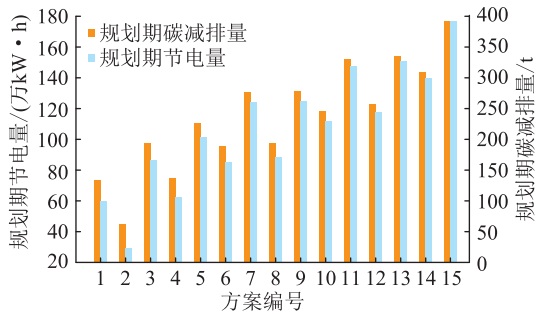


图5 规划期碳减排量及节电量

Fig.5 Carbon emission reduction and energy saving during the planning period

表3 油田节能技措组合投资收益

Table 3 Investment income from the portfolio of oilfield energy-saving technology 万元

方案编号	投资总费用	10 a 收益	方案编号	投资总费用	10 a 收益
1	42.90	-11.41	9	193.80	207.81
2	30.87	-16.59	10	181.77	210.44
3	73.86	-28.22	11	224.76	190.55
4	150.30	211.16	12	200.10	194.36
5	193.20	184.66	13	243.00	173.03
6	181.17	193.78	14	230.8	177.17
7	224.07	175.90	15	273.96	157.39
8	150.90	227.81			

为227.81万元,规划期节电量为87.2万kW·h,碳减排量达192.7t,同时该方案易于操作,在油田配电网组合降损节能技措中为最佳技措方案。主干线路改造( $G_1$ )、高损耗变压器改造( $G_2$ )以及两者组合( $G_1+G_2$ )的3种节能技措导致规划期收益为负数,无法满足投资需要,一般在油田降损中不建议采用,除非按照国家电网规划导则中存在S7及以下的高能耗变压器或已经老旧存在安全隐患的导线(强制性措施高于非强制性措施)。

同理可得,按照表中规划期投资收益进行单一节能技措优先级排序:线路集中补偿>变电所集中补偿>抽油机就地补偿>主干线路改造>高损耗变压器改造。节能技措组合优先级排序如下: $G_4+G_2>G_4+G_1>G_3+G_2>G_4+G_1+G_2>G_3+G_1>G_5+G_2>G_1+G_2+G_3$ 。同时从表3可以得出,任意一种无功补偿方式与其他节能技措相结合,都会使两者的节能效果抵消一部分,节能技措间成负协同效应。

采用基于禁忌搜索的方式进行求解和优选:根据所选择的节能技措,定义算例中油田配电网的第 $k$ 个节能技措组合方案为 $X_k(G_5, G_4, G_3, G_2, G_1)$ ,其中, $G_1-G_5$ 的可能值为0或1。将 $X_1(0,0,0,0,1)$ 作为初始规划方案,在搜索过程中当前最优方案每

次生成多种相邻方案。针对文中配电网的节能技措组合方案集,将终止条件设定为:若经过4次迭代当前最优方案都保持不变,或当前最优方案所能生成的相邻方案都已处于禁忌表中,则将当前最优方案作为全局最优方案。最优投资决策方案的搜索流程如表4所示。

表4 最优投资决策方案搜索流程

Table 4 The search process of optimal investment decision scheme 万元

迭代次数	生成方案	当前最优方案	目标函数值
1	$X_1$	$X_1$	-11.41
2	$X_3, X_5, X_9, X_{13}$	$X_9$	207.81
3	$X_8, X_{11}$	$X_8$	227.81
4	$X_{10}$	$X_8$	227.81

经过禁忌搜索流程,搜索结果与采用直接比较目标函数并校验方案约束条件的方式所得到的结果一致。同时,采用基于禁忌搜索的方式可快速定位最优解位置,而未计算所有备选的节能技措组合方案目标函数,极大缩短了计算时间。

电能质量也是衡量节能技措效果的重要因素,加入末端电压改善率作为进一步参考内容,如表5所示。配电网电压改善率为实行节能技措后对主干线末端电压提升量与初始状态电压值之比。

表5 油田节能技措组合末端电压改善率

Table 5 Terminal voltage improvement rate from the portfolio of oilfield energy-saving technology %

方案编号	末端电压改善率	方案编号	末端电压改善率
1	0.40	9	1.31
2	0.02	10	0.93
3	0.41	11	1.32
4	0.48	12	0.99
5	0.85	13	1.32
6	0.48	14	0.97
7	0.87	15	1.36
8	0.92		

从表5可以看出,高损耗变压器改造( $G_2$ )、主干线路改造( $G_1$ )的改善量较小。方案12对抽油机进行就地补偿( $G_5$ )在单独节能技措中电能质量改善最明显,达到0.99%,同时规划期节电量为115.9万kW·h,碳减排量为256.08t。但是抽油机工作特性会导致补偿的主要器件电容使用寿命变短,设备老化加快,从而使投资维修费用进一步增加,收益减少为194.36万元,相比于其余2种单独补偿措施( $G_3, G_4$ )收益略低,总体投资性价比下降。若负荷



对电能质量要求较高,此节能技措为可选最佳方案。

同理可得,单一降损方案电压质量改善率排序如下:抽油机就地补偿>线路集中补偿>变电所集中补偿>主干线路改造>高损耗变压器改造。可以看出,线路集中补偿的电压质量改善效果仅次于抽油机就地补偿,与收益综合考虑,此节能技措综合性性价比最高。

采取的节能技措越多,补偿效果越好,电能质量提高越明显,规划期碳减排量与节电量越大,但是成本相应提高,改善性价比会有所下降。

## 5 结语

文中结合油田配电网所处运行环境的特殊性,分析抽油机负荷模型,提出以抽油机负荷叠加特性为主的油田配电网特殊线损近似计算模型,并通过仿真验证了模型的有效性。根据近十年油田负荷数据,建立油田负荷电量灰色预测 GM(1,1)模型,结果表明该模型满足实际油田负荷的发展规律,可为油田负荷电量预测提供参考。

基于上述理论,分析配电网节能技措节电量数学模型并进行油田实际应用节能技措筛选,建立油田配电网节能技措优化投资模型。算例通过直接枚举比较法与禁忌搜索法进行求解,得到了不同节能措施组合实施的优先级,再根据油田不同节能技措的现场实施情况作出进一步的分析与决策,实用性更强。文中方法与模型可运用于节能投资的规划,减少资源的损耗,提升企业竞争力。

### 参考文献:

[1] 张凡,范丽,杜现秋,等. 油田电网节能降损措施分析[J]. 电气应用,2014,33(3):42-45.  
ZHANG Fan, FAN Li, DU Xianqiu, et al. Analysis of energy saving and loss reduction measures of oilfield power grid[J]. Electrotechnical Application, 2014, 33(3): 42-45.

[2] 李海清,李凡,古展基,等. 10 kV 配电网线损指标体系及降损潜力测算模型[J]. 机电工程技术,2021,50(8):163-166.  
LI Haiqing, LI Fan, GU Zhanji, et al. Line loss index system analysis and reduction potentiality calculation model for 10 kV distribution network[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(8): 163-166.

[3] 王磊,张建宾,余昆,等. 基于典型负荷曲线的配电网线损计算方法研究[J]. 智慧电力,2020,48(3):124-130.  
WANG Lei, ZHANG Jianbin, YU Kun, et al. Calculation method of distribution line loss based on typical load curve[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 124-130.

[4] 刘浩,多杰才让,周丽. 区域中压配电网的节能改造[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(6):145-150.  
LIU Hao, DUO Jiecairang, ZHOU Li. Energy-saving reconstruction of regional medium-voltage distribution network[J]. Pro-

ceedings of the CSU-EPSSA, 2018, 30(6): 145-150.

[5] 疏奇奇,肖坚红,任玮蒙,等. 电力系统中的配网线损分析方法研究[J]. 自动化与仪器仪表,2018(3):28-31.  
SHU Qiqi, XIAO Jianhong, REN Weimeng, et al. Research on line loss analysis of distribution network in power system[J]. Automation & Instrumentation, 2018(3): 28-31.

[6] 贾勇晨,葛丽娟. 配电网节能降损优化研究综述[J]. 山西电力,2018(1):1-4.  
JIA Yongchen, GE Lijuan. Review on optimization of energy-saving and loss-reduction for distribution network[J]. Shanxi Electric Power, 2018(1): 1-4.

[7] 李璟. 配电网极限线损分析与降损增效优化措施[J]. 通信电源技术,2018,35(8):216-217,219.  
LI Jing. Limit line loss analysis of distribution network and optimization measures for reducing loss and increasing efficiency[J]. Telecom Power Technology, 2018, 35(8): 216-217, 219.

[8] 马草原,孙展展,尹志超,等. 基于双重混合粒子群算法的配电网重构[J]. 电工技术学报,2016,31(11):120-128.  
MA Caoyuan, SUN Zhazhan, YIN Zhichao, et al. Reconfiguration of distribution network based on double hybrid particle swarm algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 120-128.

[9] 呼冬丽. 塔河油田电网线损分析及降损措施[J]. 企业家天地(理论版),2010(5):41.  
HU Dongli. Analysis of power grid loss and loss reduction measures in Tahe oilfield[J]. Entrepreneur World, 2010(5): 41.

[10] 张雪峰. 油田供配电系统节能问题的思考及对策[J]. 中外能源,2016,21(8):98-102.  
ZHANG Xuefeng. Some thoughts on saving energy for oilfield power supply and distribution system[J]. Sino-Global Energy, 2016, 21(8): 98-102.

[11] 王鹏. 10 kV 线路无功补偿装置在油田配网中的应用[J]. 节能与环保,2013(8):70-71.  
WANG Peng. Application of 10 kV line reactive power compensation device in oil field distribution network[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2013(8): 70-71.

[12] ZHANG Y J, ZHANG X T, LI Q H, et al. Gray theory based energy saving potential evaluation and planning for distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 57: 298-303.

[13] 郭东,王佩成,李亚,等. 基于多层次模糊评估的配电网节能潜力综合评价方法[J]. 陕西电力,2015,43(1):66-70,93.  
GUO Dong, WANG Peicheng, LI Ya, et al. Energy-saving potential comprehensive evaluation method of distribution network based on multilevel fuzzy evaluation[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(1): 66-70, 93.

[14] 欧阳森,耿红杰,杨家豪. 低压配网台区电压改善潜力评估方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):123-128.  
OUYANG Sen, GENG Hongjie, YANG Jiahao. Evaluation of regional voltage improvement potential for low-voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,



- 36(1):123-128.
- [15] 王雅妮,郑涛,史艳刚. 计及低碳效益的配电网降损方案组合优选模型[J]. 分布式能源,2019,4(1):13-16.  
WANG Yani,ZHENG Tao,SHI Yangang. Combined optimization model of distribution network loss reduction scheme considering low carbon efficiency[J]. Distributed Energy,2019,4(1):13-16.
- [16] 武晓朦,费汪浩,封园,等. 含时变抽油机负荷的油田配电网网络重构[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(11):61-66.  
WU Xiaomeng,FEI Wanghao,FENG Yuan,et al. Reconfiguration of oil-field distribution network considering time-varying oil pumping loads[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA,2017,29(11):61-66.
- [17] 杨楠,李宏圣,袁景颜,等. 计及灰色关联度分析的中长期负荷灰色预测方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(6):108-114.  
YANG Nan,LI Hongsheng,YUAN Jingyan,et al. Medium-and long-term load forecasting method considering grey correlation degree analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA,2018,30(6):108-114.
- [18] 黄海宏,颜碧琛,王海欣. 改进灰色 GM(1,1) 模型的 EAST 快控电源输出电流预测[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(5):128-136.  
HUANG Haihong,YAN Bichen,WANG Haixin. Prediction of output current of EAST fast control power supply based on improved grey GM(1,1) model[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2021,35(5):128-136.
- [19] 李俊芳,张步涵,谢光龙,等. 基于灰色模型的风速-风电功率预测研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(19):151-159.  
LI Junfang,ZHANG Buhan,XIE Guanglong,et al. Grey predictor models for wind speed-wind power prediction[J]. Power System Protection and Control,2010,38(19):151-159.
- [20] 潘友权,杨圣利. 配电网无功功率补偿的经济效益分析[J]. 电子元器件与信息技术,2020,4(1):105-107.  
PAN Youquan,YANG Shengli. Multi-objective comprehensive energy saving potential evaluation of distribution networks[J]. Electronic Component and Information Technology,2020,4(1):105-107.
- [21] GUPTA A R,KUMAR A. Energy saving using D-STATCOM placement in radial distribution system under reconfigured network[J]. Energy Procedia,2016,90:124-136.
- [22] 李晓彤,李肇汉. 基于遗传禁忌混合算法的配电网无功优化[J]. 电工电气,2019(4):13-18.  
LI Xiaotong,LI Zhaohan. Reactive power optimization of power distribution network based on genetic tabu hybrid algorithm[J]. Electrotechnics Electric,2019(4):13-18.

---

作者简介:



王富

王富(1995),男,硕士,研究方向为综合能源系统(E-mail:15928543809@163.com);

杨威(1990),男,博士,讲师,研究方向为电动汽车充电设施规划、综合能源系统;

张安安(1977),男,博士,教授,研究方向为综合能源系统、电气协调控制。

## Investment decision-making method for energy saving and loss reduction in oilfield distribution network

WANG Fu<sup>1</sup>, YANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG An'an<sup>1</sup>, ZOU Yushi<sup>1</sup>, LIU Ning<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Karamay City Water Supplies Co., Ltd., Karamay 834000, China)

**Abstract:** In order to meet the development needs of economic and efficient in oilfield distribution network, and to realize the goal of low carbon more quickly, the investment decision-making method of energy-saving measures optimization is proposed. Firstly, the loading behaviors of pumps is analyzed, an calculation model for special line loss of oilfield distribution network based on load superposition characteristics is proposed, which is corrected according to the actual load of oilfield. Next, according to different energy-saving models and the GM(1,1) gray prediction model, the optimization investment decision model of oilfield distribution network is established. Then, based on the characteristics of oilfield energy-saving measures, the direct comparison objective method and the taboo search method are respectively selected to solve the solution of the different oilfield scale. Finally, a 30-node 6 kV distribution network line in an oilfield is taken as an example for simulation verification. The results show that the energy-saving and loss reduction scheme of oilfield distribution network obtained by the investment decision-making method in this paper has high cost performance and can effectively improve the voltage at the end of the line.

**Keywords:** oilfield distribution network; investment decisions; energy-saving technology; grey prediction; load characteristics; taboo search algorithm

(编辑 方晶)