

考虑农业电排灌负荷的配电网运行优化策略研究

纪 历¹,杨晓伟¹,陈振宇²,杨 斌²

(1. 河海大学 能源与电气学院,南京 210098;2. 国网江苏省电力有限公司,南京 210000)

Research on power distribution network operation optimization strategy considering agricultural electric drainage and irrigation load

Ji Li¹, YANG Xiaowei¹, CHEN Zhenyu², YANG Bin²

(1. Energy and Electrical College, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

摘要:农业经济和配电网自动化技术的快速发展给电排灌负荷的精细管理和参与电网调控提供了可能。首先,分析了电排灌用电特性,将泵站的运行优化问题转化为线性优化问题,利用LINGO计算在分时电价下泵站电排灌的最佳运行策略,将优化后的电排灌负荷代入配电网中;然后,分析了电排灌负荷对配电网造成的不利影响,提出用粒子群优化算法计算配电网运行的优化策略。最后,以IEEE 33节点标准算例进行分析,验证了提出的运行优化策略的有效性。

关键词:电排灌;粒子群;配电网运行;LINGO

Abstract: The rapid development of agricultural economy and power distribution network automation technology provides possibility for fine management of electric irrigation load and participation in grid regulation. Firstly, the electricity characteristics of electric irrigation load are analyzed. Then the optimum operation strategy of electric irrigation load under the influence of time-shared electricity price is calculated with LINGO model. On this basis, the particle swarm optimization algorithm is used to calculate the optimal operation strategy of distribution network, which takes into account the influence of electric irrigation load. The example based on the IEEE33 is analyzed, which verifies the effectiveness of the operation optimization strategy proposed.

Key words: electric drainage and irrigation; particle swarm; the operation of power distribution network; LINGO

0 引言

电能替代作为转变能源发展方式、实现能源战略转型、实施能源革命的重大举措,已成为当前能源研究方向的前沿。国家出台了一系列政策推广电能替代,如明确指出在工农业生产领域推广电灌溉措施等^[1]。电排灌负荷是农业负荷中占比最大的负荷,长期以来,其用电存在管理粗放、季节性强等特点,给电网的调控管理带来了困难,尤其是在夏季,农业排灌负荷与空调负荷叠加,大大增加了电网的峰值负荷,不利于电网的经济运行。

目前国内外关于电排灌优化运行的研究较少,大部分研究集中于电排灌泵站内机组的优化运行和多个泵站站间的优化运行。文献[2]基于大系统分解-协调理论,通过水力学建立仿真模型,提出

了泵站优化运行方案。文献[3]分析了大型泵站优化运行方案的研究优化范围。文献[4]基于遗传算法计算了考虑分时电价的电排灌泵站内各时段开启的最优机组数和运行工况。文献[5]提出了一种考虑水泵装置效率与流量、扬程和转速之间函数关系的自动控制系统,从而提高水泵的运行效率。

重构作为配电网优化控制的重要手段,国内外已经有了较多的研究成果,按时间尺度可以将其划分为静态重构和动态重构。静态重构研究的是某一时间断面下的配电网网络重构方案;动态重构是求解一段时间内考虑负荷等不确定因素时序特性的配电网重构方案。文献[6]利用图论的思想对粒子位置的更新方法做出了修正,将二进制粒子群算法应用于配电网的重构算法中,提高了计算的速度。文献[7]考虑了分布式电源出力的随机模型,以万有引力搜索算法研究了配电网效益最大时的配电网重构方法。文献[8]介绍了DSSR配电网安全域指标,采用遗传算法求解基于DSSR建立的以网损最优为目标的配电网重构模型。

当前的研究主要是对电排灌站内水泵的工况进行研究,而对电排灌负荷参与电网调控的研究较少,尤

收稿日期:2020-01-06;修回日期:2020-05-19

基金项目:国家电网公司总部科技项目“电能替代典型场景优化互动及电网调控支撑技术研究及应用”

This work is supported by Science and Technology Program of SGCC “Optimization, Interaction, Regulate and Control of Power Grid for Typical Scenarios of Electric Energy Substitution”

其对于电排灌负荷参与电网调控的效益分析仍然处于空白阶段。本文首先分析了电排灌用电特性,将泵站的优化运行转为线性优化问题,利用LINGO软件计算在分时电价下泵站内电排灌的最佳运行策略,在此基础上,采用粒子群算法计算考虑电排灌负荷影响的配电网运行优化策略。算例分析表明,本文提出的方法能够在保证排灌任务的同时,减少用户的用电费用,并可以减少电网的峰谷差,有利于电网的经济运行。

1 农业电排灌负荷用电特性

1.1 电排灌负荷特性

电排灌一般位于城市的郊区或者农网地区,负荷与电源点的位置较远,造成线路的损耗较大。农业排灌负荷具有明显的季节性特点,图1所示为某地区年电排灌负荷。

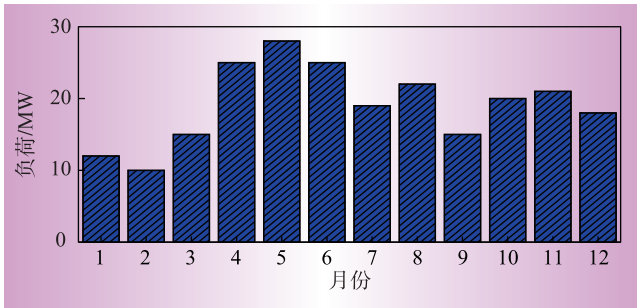


图1 某地区年电排灌负荷
Fig. 1 Annual agriculture irrigation and drainage load in a region

由图1可知,3月中旬~8月中旬是全年排灌高峰期,平均排灌负荷维持在高水平。6月~8月的最大排灌负荷与夏季空调制冷负荷叠加后,电网负荷峰值进一步加大,造成负荷高峰时段电力不足。因此在电网迎峰度夏时期,需要对农业电排灌负荷进行调节,在满足农业排灌要求的基础上进行优化用电,降低电网的峰谷差,促进电网的经济运行。

图2所示为某地区8月份农网的负荷曲线。

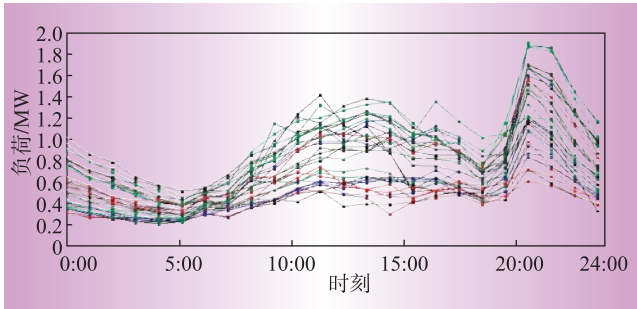


图2 某地区农网8月份负荷曲线
Fig. 2 Load curves of agricultural power network on august in a region

由图2可知,8月份日负荷曲线在11:00和20:00出现了2个高峰,而这个时段一般属于分时电价中的高电价价位,因此存在很大的优化空间。

1.2 电排灌负荷计算

一般工程应用中,排灌站电气设备的用电负荷可以采用需要排灌的流量和扬程来近似计算,计算公式如下

$$P=9.81\frac{QH}{\eta}$$
 (1)

式中: Q 为水流量, m^3/s ; H 为总扬程, m ; η 为水泵、电动机及传动装置的总效率,单级水泵 η 可取0.7。

目前我国大部分大型电排灌站所安装的泵多为可调节叶片的轴流泵,通过调节叶片的角度可以控制水泵的水流量^[9],这就使得泵站的优化运行成为了可能。

1.3 电排灌站的灌水流量

在实际运行中,排灌站的灌水流量和作物品种、土壤性质、耕作技术及水文气象等因素关系密切。我国几种主要作物的需水量如表1所示。工程应用中通常通过查询表1中的数据,大致确定排灌站灌水片区内的水流量,然后再对泵站的运行进行优化。

表1 我国几种主要作物的需水量

Table 1 Water requirement of several main crops in China $m^2/(666.7\ m^2)$

作物	地区	年份		
		干旱年	中等年	湿润年
双季稻	华中、华东	300~450	250~400	200~300
	华南	300~400	250~350	200~300
早稻	华中、华东	400~550	300~500	200~450
一季晚稻	华中、华东	500~700	450~650	400~600
冬小麦	华北 北部	300~500	250~400	200~350
	华北 南部	250~450	200~400	160~300
	华中、华东	250~450	200~350	150~280
春小麦	西北	250~350	200~300	
	东北	200~300	180~280	150~250
玉米	西北	250~300	200~250	
	华北	200~250	150~200	130~180

每次灌水所需的田间净需水量 Q 如下

$$Q=\eta_{渠系}\sum_{i=1}^nm_iA_i$$
 (2)

式中: A_i 为各种作物的种植面积, $666.7\ m^2$; n 为作物的种类; m_i 为相应的灌水定额, $m^2/(666.7\ m^2)$; $\eta_{渠系}$ 为渠系水利用系数。

2 农业电排灌泵站运行优化模型

泵站的优化运行实际就是研究在满足排灌水流量的前提下,如何合理确定泵站内水泵的开启台数、

运行方式,从而使得泵站的运行费用最低。机电排灌每年耗费的能源是十分巨大的,具有很大的节能潜力。设泵站内共计 n 台水泵机组,则泵站的优化模型如下

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^n C_i \cdot P_i \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^n Q_i = Q_{\text{总}} \\ & Q_i \leq Q_{\text{max}} \\ & n \cdot Q_{\text{max}} > Q_{\text{总}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: C_i 为 t 时刻的电价; P_i 为第 i 台机组的用电负荷; Q_i 为第 i 台机组需要排水的流量, P_i 与 Q_i 的关系满足式(1); Q_{max} 为 i 台水泵最大排水量; $Q_{\text{总}}$ 为电排灌片区内所需灌水流量,其值根据灌溉区的实际情况和表1采用式(2)计算得出。泵站的优化运行首先要满足泵站的灌溉能力 $n \cdot Q_{\text{max}}$ 大于 $Q_{\text{总}}$,这样电排灌站才有具备调节的可能。

泵站的运行优化问题是一个典型的线性优化问题,故采用 LINGO 优化软件进行编码求解。LINGO 常用于解决线性优化问题,在 LINGO 中输入上述决策目标函数和约束条件,利用 LINGO 强大的运算能力进行计算,得到泵站运行优化策略,通过求解得出泵站最佳排水流量,结合水泵的性能曲线,调节泵站的运行方式,使电排灌站达到最优的运行状态。

3 考虑电排灌负荷的配电网运行优化策略

电排灌负荷在分时电价的作用下会发生负荷转移,负荷转移到电价较低的时段,将改变配电网的潮流。然而配电网的网络结构无法适应电网潮流的变化,电网的运行没有进行优化,从而造成电网的损耗增加。因此,本文将优化后的电排灌负荷纳入配电网优化中,通过重构对配电网的网络结构进行优化,减少电网的损耗。

3.1 模型建立

3.1.1 目标函数

电网损耗是配电网运行中的重要成本,因此选择配电网的有功损耗作为综合优化的目标函数,计算公式如下

$$\min \Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=0}^{23} \sum_{j=1}^n \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} R_{ij} \quad (4)$$

式中: i 、 j 分别为支路 ij 的首、末节点; U_i 为支路 ij 的首端电压; P_{ij} 、 Q_{ij} 和 R_{ij} 分别为支路 ij 上的有功功率、无功功率和电阻; t 为优化的时刻。

此外配电网中线路上的负荷越均衡,表明电网

的运行效率越高,因此将负荷均衡指标纳入优化的目标函数中,其计算公式如下

$$\min D_{\text{Line}} = \sum_{t=0}^{23} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{i,\text{Line}} - T_{\text{av,Line}})^2}{n}} \quad (5)$$

式中: D_{Line} 为负荷均衡度指标,反映了配电网各条回路负载率和负载率平均值的偏移度; $T_{i,\text{Line}}$ 为优化后第 i 回线路的负载率; $T_{\text{av,Line}}$ 为优化后负载率的平均值。

则配电网运行优化控制策略的目标函数为

$$\min(\lambda_1 \cdot \Delta P_{\Sigma} + \lambda_2 \cdot D_{\text{Line}}) \quad (6)$$

式中: λ_1 、 λ_2 为权重系数。

3.1.2 约束条件

(1) 潮流方程约束如下

$$P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (7)$$

$$Q_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (8)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 处的有功、无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为支路 ij 的电导、电纳。

(2) 线路的节点电压约束如下

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (9)$$

式中: U_i 为优化后节点 i 的电压值; $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点 i 的电压允许的上、下限值。

(3) 网络拓扑约束如下

$$L_3(x) : x \in G \quad (10)$$

式中: G 为所有辐射状网络结构集合。

(4) 开关操作次数如下

$$\min O_{\text{sum}} = \sum O_i \quad (11)$$

式中: O_{sum} 为开关操作的总次数; O_i 为节点 i 处开关操作次数。

3.2 算法实现

本文采用文献[10]提出的基于功率矩法的重构时段划分,对配电网动态重构的时段进行划分。

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 的本质是基于群体行为的优化智能算法^[11]。

标准粒子群算法的基本流程如下:

(1) 对粒子群算法进行初始化,设定粒子群规模为 M ,惯性权重系数的上、下限为 $w_{\min}$ 、 $w_{\max}$,确定学习因子 c_1 、 c_2 的值,设定算法的终止条件为满足最大迭代次数 $I_{\max}$ 等;

(2) 在设定的可行域范围内,利用轮盘的方法随机初始化粒子的位置和速度,以及个体极值和全局极值;

- (3) 对粒子的位置和速度进行更新和调整;
- (4) 计算每个粒子的适应度值,进而更新个体极值和全局极值;
- (5) 当迭代次数达到预定的 $I_{\max}$ 时终止搜索,输出最优结果。

配电网重构算法中,计算的维度大、计算复杂,为了减少粒子群算法的维度,减少计算量,需要对配电网的网络进行简化。

从配电网的拓扑分析可知,其具有以下2个特点:一是配电网的运行需要满足辐射状的约束,当配电网中某个联络开关闭合的时候,就会形成一个环,为了满足约束,必须断开环网中的一个开关;二是为了保证配电网下游供电不形成孤岛,不在环网中的开关必须闭合,因此在配电网网络重构时,这类开关不作为控制的变量,始终属于闭合的状态。

基于上述2个配电网的拓扑特点,在利用粒子群算法对配电网进行重构之前,可以通过以下3个步骤对配电网的网络结构进行简化:一是找到配电网中的基本环路,从而确定配电网网络重构中的控制变量;二是不在环路上的开关不属于控制变量,因此在简化过程,将不在基本环路上面的支路删除;三是通过合并解环效果一样的支路对配电网网络进行简化。

在配电网重构编码中,需要在配电网网络结构简化分析的基础上,根据参考文献[12]中的方法对PSO中的粒子进行编码。

首先应对每个基本环中含有的开关进行编号,将配电网中基本环的数目当做粒子群中搜索空间的维数,每个基本环内开关的编码号即为粒子的位置,利用这种方法对粒子进行编码。图3所示为IEEE 33节点的标准算例,其存在5个联络开关,共计有5个基本环路。

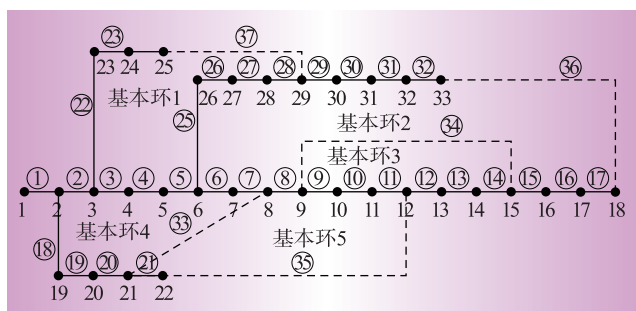


图3 IEEE 33节点的配电网结构图

Fig. 3 IEEE 33 node distribution network structure

由图3可知:

基本环路S1 = {22,23,37,28,27,26,25,5,4,3};

基本环路S2 = {25,26,27,28,29,30,31,32,36,17,

16,15,14,13,12,11,10,9,8,7,6};

基本环路S3 = {34,14,13,12,11,10,9};

基本环路S4 = {2,3,4,5,6,7,33,20,19,18};

基本环路S5 = {8,9,10,11,35,21,33}。

其中,{ }中代表的是支路号,采用选择支路在所在基本环中的位置,对开关进行操作。假设支路{23,27,34,18,11}需要断开,则搜索空间的编码为2、3、1、10、4。在搜索空间第 i 维的范围为1到size(S_i),size(S_i)代表的是开关集合 S_i 的大小。

具体算法流程如下:

(1) 根据配电网中负荷的数据,计算配电网的功率矩不平衡度,然后对重构时段进行划分;

(2) 对配电网的网络进行简化分析处理;

(3) 初始化粒子群程序,设定粒子群规模 M ,惯性权重系数上下限 $w_{\min}$ 、 $w_{\max}$,学习因子 c_1 、 c_2 的值,以及粒子群算法终止的条件,即最大迭代次数 $I_{\max}$ 等参数;

(4) 对粒子群的位置和速度进行初始化,依次选择5个基本环中的1个开关,将其断开,并将其他开关置为不可操作;

(5) 将配电网中的开关状态构成的群体当做网络重构中的自变量,并检验网络是否满足辐射状约束,然后进行潮流计算,将计算出的目标函数的期望值作为粒子群中的适应度值;

(6) 根据当前位置的个体极值去选择更新历史个体极值;若存在粒子的个体极值优于群体的全局极值,那么用个体极值去替换该粒子原本的全局极值;

(7) 更新粒子群中粒子的飞行速度以及位置;

(8) 判断粒子群算法是否到达设定好的最大迭代次数 $I_{\max}$,若是则停止迭代,否则返回步骤(5)。

4 算例分析

根据某排灌站装置受水潮位变化的影响,将某天划分为4个时段,不同时段电价、平均装置的扬程表如表2所示。

表2 不同时段电价、平均扬程

Table 2 Electricity price and average head in different periods

时段	电价/(元·kWh ⁻¹)	平均扬程/m
8:00~14:00	0.7	3
14:00~20:00	0.5	4
20:00~2:00	0.3	7
2:00~8:00	0.3	8

分时电价在很多地方得到了广泛的应用,是电

网调控用电负荷的重要手段之一。因此本文的算例分析计及了分时电价对电排灌负荷调控的影响,假设该站某日应排灌水量为 $2.5\times 10^4\text{ m}^3$,则考虑分时电价的日运行优化方案结果如表3所示。

表3 考虑分时电价的电排灌站优化结果

Table 3 Optimization results of electric irrigation and drainage stations considering time-of-use electricity price

时段	扬程/m	优化前各时段的总水量/ m^3	优化前用电费用/元	优化前用电量/ kWh
8:00~14:00	8	6 250	1 839.3	2 581.5
14:00~20:00	4	6 250	1 751.7	3 442.1
20:00~2:00	7	6 250	1 839.3	6 023.6
2:00~8:00	3	6 250	2 102.1	6 884.2
时段	优化后各时段的总水量/ m^3	优化后用电费用/元	优化后用电量/ kWh	
8:00~14:00	8 000	2 354.3	3 363.4	
14:00~20:00	8 000	2 242.2	4 484.5	
20:00~2:00	8 000	2 354.4	7 848.1	
2:00~8:00	1 000	336.3	1 121.1	

由表3可得,优化前,电泵站总用电费用为7 532.7元,优化后用电费用为7 287.4元。因此在分时电价下,采用本文提出的算法对水泵的运行进行优化,可以节省费用245.3元。

本章采用IEEE 33节点标准配电网算例,网络结构图如图4所示。

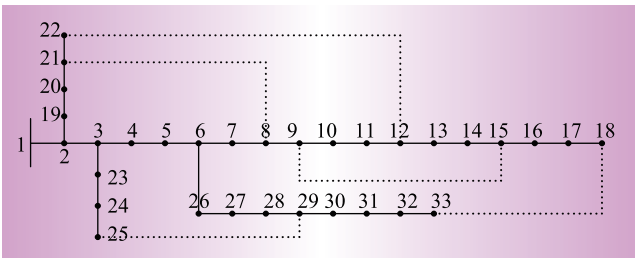


图4 IEEE 33节点的配电网网络结构图

Fig. 4 IEEE 33 node distribution network structure diagram

该配电系统中,含有32条分段开关、5条联络开关支路。假设电排灌负荷安装在14节点,电排灌的负荷曲线如图5所示,其他节点的负荷数据采用某地区24 h居民负荷数据代入。

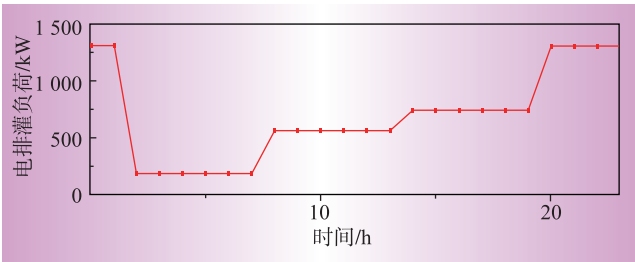


图5 电排灌的负荷曲线

Fig. 5 Electric drainage irrigation load curve

设PSO中 M 为100, $I_{\max}$ 为500,学习因子 c_1 、 c_2

分别为1.5、1.1,电压上、下限分别为5%、-5%,优化方案如表4所示。

表4 网络重构方案

Table 4 Network reconstruction solution

优化时段	网络重构节点
0:00~7:00	8-21/9-15/12-22/18-33/25-29
8:00~21:00	7-8/14-15/9-10/32-33/25-29
22:00~23:00	7-8/14-15/9-10/32-33/28-29

优化前配电网的总网损为2 577.98 kWh,优化后系统总网损为1 789.12 kWh,网损下降30.6%。优化前后负荷均衡度指标由优化前的0.160 5下降到0.064 01,说明配电网的负荷均衡提升,表明配电网的运行效率特得到了优化。

综上所述可知,本文提出的考虑农业电排灌负荷的电网运行优化策略不仅可以减少农业用户的用电费用,调节农业电网的负荷减少电网的峰谷差,还可以减少电网侧的损耗,平衡线路的负载,有利于电网的经济运行。

5 结束语

本文首先分析了电排灌的用电特性,利用LINGO计算在分时电价影响下电排灌的最佳运行策略。在此基础上,采用粒子群算法计算得出在电排灌负荷影响下的配电网运行优化策略。最终用算例分析,验证了本文提出的方法能在减少农业用户用电费用的同时,减少电网的损耗、平衡电网的负载。此外,电排灌负荷在运行过程中消耗大量的无功,如何在本文研究基础上对电网的无功负荷进一步优化,是本文接下来的研究方向。

参考文献:

[1] 国家能源局. 实施电能替代推动能源消费革命——解读《关于推进电能替代的指导意见》[J]. 中国经贸导刊, 2016(18): 51-52.
National Energy Administration. Implement electric energy substitution to promote energy consumption revolution——interpretation of “guiding opinions on promoting electricity substitution” [J]. China Economic & Trade Herald, 2016(18): 51-52.
[2] 马箐箐. 梯级泵站系统优化运行策略及设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
MA Qingqing. Optimized operation strategy and design of cascade pumping station system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
[3] 陶东, 李娜, 肖若富, 等. 多级提水泵站优化调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(5): 123-127.

(下转第76页)