

Reactive Power and Voltage Control in a Distribution System by Quantum-Inspired Gravitational Search Algorithm

Ruey-Hsun Liang, Chien-Yu Lai, Yie-Tone Chen, Wan-Tsun Tseng

Department of Electrical Engineering, National Yunlin University of Science and Technology, Yunlin
Email: liangrh@yuntech.edu.tw, m10012235@yuntech.edu.tw, chenyt@yuntech.edu.tw, tsengwt@yuntech.edu.tw

Received: Mar. 25th, 2013; revised: Mar. 29th, 2013; accepted: May 16th, 2013

Copyright © 2013 Ruey-Hsun Liang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: This paper investigates reactive power and voltage control in a distribution system by dispatching the main transformer ULTC and capacitors. The main purpose is to reduce the feeder loss and improve the bus voltage profile of the distribution system. The devices of reactive power and voltage control are properly dispatched to control the voltage and to provide reactive power. And the constraints that must be considered include the maximum allowable number of switching operation in a day for ULTC and each capacitor, the bus voltage limit on each bus, the line flow limit on each feeder, and the power conservation limit on each bus. Under satisfying these constraints, the distribution network can provide stable voltage to the consumers, and the quality of power supply can be enhanced. The quantum-inspired gravitational search algorithm (QGSA) is proposed for solving the reactive power and voltage control problem in a distribution system. The QGSA approach is based on the gravitational search algorithm. And the concept and principles of the quantum computing are added to update the solution, so that the global optimal solution can be efficiently found. To confirm the usefulness of the proposed method, a 30-bus distribution system is performed. It is found from the results that the proposed method can effectively get a satisfying solution.

Keywords: Distribution System; Reactive Power and Voltage Control; ULTC; Capacitor; Quantum Computing; Gravitational Search Algorithm

以量子启发式引力搜寻法作配电系统的虚功率及电压控制

梁瑞勋, 赖建宇, 陈一通, 曾万存

国立云林科技大学电机工程系, 云林
Email: liangrh@yuntech.edu.tw, m10012235@yuntech.edu.tw, chenyt@yuntech.edu.tw, tsengwt@yuntech.edu.tw

收稿日期: 2013年3月25日; 修回日期: 2013年3月29日; 录用日期: 2013年5月16日

摘要: 本文是藉由调度配电系统之主变压器有载分接头和电容器来控制虚功率与电压。其主要目的是降低配电系统中的馈电线损失及改善汇流排的电压偏移量, 以达到节约能源、并使系统电压能够操作在稳定的范围内。利用虚功率与电压控制设备, 加以适当的规划调度, 来控制电压及提供虚功率, 同时也必须满足限制条件, 其限制条件包含主变压器有载分接头及所有电容器一天之中的最大总切换次数需在限制的次数内, 及各汇流排的电压需维持在其限定的范围内, 以及电力守恒与线路输电容量限制。在满足限制式的条件下, 配电网路能供给用户稳定的电压并提升供电品质。本文采用量子启发式引力搜寻法(Quantum-Inspired Gravitational Search Algorithm, QGSA)来作配电系统的虚功率及电压控制问题。量子启发式引力搜寻法是一种以引力搜寻法为基础, 并结合量子计算观念与原理, 更新解的位置, 使其可以有效的搜寻到全域最佳解的算法。为了证实本文所使用的方法有效性, 文中以一 30 个汇流排的配电系统作测试。由结果得知, 本文所采用的方法确实能有效的得到令人满意的结果。

关键词：配电系统；虚功率与电压控制；有载分接头；电容器；量子计算；引力搜寻法

1. 引言

配电系统中存在许多非电阻性元件，造成系统中电压与电流相位差异，因而产生虚功率的流动，会增加馈电线的实功率损失，以及影响馈电线电压稳定。配电系统的虚功率与电压控制设备主要包括变压器有载分接头，以及二次侧汇流排并联电容器组，和馈电线上并联电容器组等设备。若要降低各个馈电线的实功率损失，就必需将这些虚功率和电压控制设备加以适当的规划调度，以改善供电品质。

在过去有许多的研究，在求解配电系统中虚功率及电压控制的问题。在文献^[1]中是提出动态规划法，来规划求得有载分接头以及电容器组开关的状态，以降低馈电线总损失，并改善电压偏移量和虚功率流入主变压器。在文献^[2]中以模拟退火法来规划求得配电系统隔日最佳的有载分接头位置及电容器开关的状态。在文献^[3]中使用一种以时间间隔为基础的方法，将一日负载变动情形分割成数个负载间隔，并找到各个负载间隔最理想的分接头位置和电容器状态，以减少开关操作次数。在文献^[4]中提出一个改良型的类神经网络方法，来控制有载分接头与静态同步补偿器之间的协调，维持汇流排电压在可接受的范围内。在文献^[5]中考虑以感应电机为基础的分散式发电机对有载分接头和电容器组的影响，并适当的协调控制虚功率与电压设备，来尽量减少实功率损失。在文献^[6]中提出一个有载分接头与电容器协调控制方法，采用多级电压控制，来减少电压控制设备的总操作量和实功率损失。在文献^[7]中使用一种进化为基础的演算法，来调度有载分接头和电容器组，并且考虑到谐波来最小化能量损失和改善电压。在文献^[8]中使用一个非线性内点法和离散处罚为基础的演算法，并调整电容器一天最大开关切换操作次数限制，来使能量损失达到最小。在文献^[9]中提出以模糊最佳化方法来规划求得含风力发电机之配电系统中有载分接头以及电容器组开关的状态，以降低馈电线总损失，并改善电压偏移量和虚功率流经主变压器。

在求解高维度的最佳化问题时，由于搜索空间会随着问题的规模倍增，以往的优化算法较不适合用来求解。在过去的几十年里，有越来越多模仿自然现象

行为的演算法，例如模拟退火法^[10]，粒子群优法^[11]，蚁群搜索法^[12]，差分进化法^[13]，基因演算法^[14]，量子进化式演算法^[15]，引力搜寻法^[16]等方法被提出。然而，没有一种演算法适合所有优化问题。本文提出量子启发式引力搜寻法，其特点是利用引力搜寻法^[16]为基础，并结合量子计算观念与原理^[15]，例如控制变数以量子位元(Q-bit)方式编码，比起传统二位元编码与实数型编码，有更好的多样性，增强质点的搜索能力，让解可以有有效的搜寻到全域最佳解，并防止提早收敛至区域解。本文应用量子启发式引力搜寻演算法作配电系统的有载分接头与电容器调度问题，其目的在于希望得出一天之中有载分接头位置及电容器的最佳调度排程，以保持系统的良好供电品质。

为了验证量子启发式引力搜寻演算法求解配电系统的虚功率及电压控制问题的有效性，以一 30 个汇流排的配电系统当成测试系统，文中并以传统基因演算法、差分进化法与引力搜寻法来作测试比较。由测试结果可以得知，应用本文所提出的方法，确实能比传统基因演算法、差分进化法与引力搜寻法的效果来得好。

2. 问题描述

配电系统中，在主变压器上装设有载分接头，其主要的功用为在负载变动的时候，调整主变压器二次侧汇流排电压可以维持在期望值附近。在二次侧汇流排装设并联电容器组，主要是为了提供虚功率，以降低流经主变压器的虚功率潮流，并且改善主变压器之功率因数。另外在其下属的馈电线上，加装的并联电容器，其功用在于补偿馈电线上的虚功率潮流，改善馈电线上各个区段的电压，以及降低馈电线上实功率的损失。

在作配电系统有载分接头和电容器调度的问题里，要达成的目标是在预测负载的情况下，规划出一天当中的主变压器有载分接头位置，以及各汇流排上并联电容器开关的切换情形，并尽可能的降低一天之中各个时段的馈电线的输电损失。而在达成目标的同时，也必须满足限制条件，其限制条包含主变压器有载分接头一天之中的最大总切换次数，及各汇流排上

并联电容器开关最大总切换次数必须限制在一定的次数内，其限制次数分别为 30 次以及 4 次，以延长设备之寿命及降低系统设备维修之成本。此外，限制各汇流排的电压必须维持在所限定的范围内，以及电力守恒与线路输电容容量限制。

综合上述的目标以及限制条件，我们可将问题以数学模式来描述，其数学式描述如下：

$$\text{Min} \sum_{h=1}^{24} P_{\text{loss},h} \quad (1)$$

并满足以下的限制式：

$$\sum_{h=1}^{24} |\text{Tap}_h - \text{Tap}_{h-1}| \leq 30 \quad (2)$$

$$\sum_{h=1}^{24} |C_{n,h} - C_{n,h-1}| \leq 4 \quad n = 1, 2, \dots, N_c \quad (3)$$

$$V_{i,\min} \leq V_{i,h} \leq V_{i,\max} \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_b; \quad h = 1, 2, \dots, 24$$

$$S_{l,h} \leq S_{l,\max} \quad (5)$$

$$l = 1, 2, \dots, N_L; \quad h = 1, 2, \dots, 24$$

$$P_{i,h} = P_{i-1,h} - \left(\frac{\Delta V_{(i-1,i),h}^2}{R_{i-1,i}} \right) - P_{li,h} \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_b; \quad h = 1, 2, \dots, 24$$

$$Q_{i,h} = Q_{i-1,h} + Q_{ci,h} - \left(\frac{\Delta V_{(i-1,i),h}^2}{X_{i-1,i}} \right) - Q_{li,h} \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_b; \quad h = 1, 2, \dots, 24$$

其中

$P_{\text{loss},h}$ ：第 h 个小时馈电线上的总实功率损失。

Tap_h ：第 h 小时主变压器有载分接头的位置，包含 -8, -7, ..., 7, 8 等 17 个整数值之位置，在一天的调度时间内，有载分接头位置的总移动次数限制为 30 次。

$C_{n,h}$ ：第 n 个电容器在第 h 小时的状态， $C_{n,h} = 0$ 表示电容器切离， $C_{n,h} = 1$ 表示电容器投入。

N_c ：电容器组的数量。

$V_{i,h}$ ：第 i 个汇流排在第 h 小时的电压。

$V_{i,\max}$ ：第 i 个汇流排的电压上限。

$V_{i,\min}$ ：第 i 个汇流排的电压下限。

N_b ：汇流排的数量。

$S_{l,h}$ ：第 l 条馈电线路在第 h 小时的负载流量。

$S_{l,\max}$ ：第 l 条馈电线路的最大承载容量。

N_L ：馈电线的数量。

$P_{i,h}$ ：在第 h 小时流出第 i 个汇流排的实功率。

$Q_{i,h}$ ：在第 h 小时流出第 i 个汇流排的虚功率。

$\Delta V_{(i-1,i),h}$ ：在第 h 小时第 $i-1$ 个汇流排和第 i 个汇流排之间的电压差。

$R_{i-1,i}$ ：第 $i-1$ 个汇流排和第 i 个汇流排之间的馈线电阻。

$X_{i-1,i}$ ：第 $i-1$ 个汇流排和第 i 个汇流排之间的馈线电抗。

$P_{li,h}$ ：第 i 个汇流排在第 h 小时的实功率负载。

$Q_{li,h}$ ：第 i 个汇流排在第 h 小时的虚功率负载。

$Q_{ci,h}$ ：在第 h 小时第 i 个汇流排电容器注入的虚功率。

3. 以量子启发式引力搜寻法作配电系统的虚功率及电压控制

本文利用引力搜寻法^[16]为基础，并结合量子计算观念与原理^[15]，提出以量子启发式引力搜寻法作配电系统的虚功率及电压控制问题。首先介绍量子计算的观念与原理，接着说明解的结构及能量函数的建立，最后是演算法的步骤，说明如下：

3.1. 量子计算的观念与原理

在量子计算中，最小的讯息单位为量子位元 (Q-bit)，并且经由量子旋转闸更新量子位元。本文提出的演算法是依据量子计算的观念与原理，更新解的位置，直到符合迭代停止条件。量子位元与量子旋转闸说明如下^[15]：

3.1.1. 量子位元(Q-bit)

量子位元 α_d 及 β_d 为一个解 \mathbf{x} 的最小讯息单位。 \mathbf{x} 与量子位元 α_d 及 β_d 的关系式如下所示：

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_d \ \dots \ x_N] \\ = \left[\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} \alpha_d \\ \beta_d \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} \alpha_N \\ \beta_N \end{pmatrix} \right] \quad (8)$$

其中 x_d 对应着一对量子位元 α_d 与 β_d ； α_d 与 β_d 的数值必须介于 0 至 1 之间，且必须满足：

$$(\alpha_d)^2 + (\beta_d)^2 = 1 \quad (9)$$

即

$$\alpha_d = \cos \theta_d \quad (10)$$

$$\beta_d = \sin \theta_d \quad (11)$$

其中 θ_d 为 x_d 对应的量子角度。

因此将 \bar{x} 转换成量子角度型态的解 $\bar{\theta}$ ，表示如下：

$$\bar{\theta} = [\theta_1 \theta_2 \cdots \theta_d \cdots \theta_N] \quad (12)$$

其中

$$\theta_d = \tan^{-1}(\beta_d/\alpha_d) \quad (13)$$

3.1.2. 量子旋转闸

如图 1 所示，量子位元更新模式是经由一个旋转角度 $\Delta\theta_d$ ，使 (α_d, β_d) 旋转更新至 (α'_d, β'_d) 。

3.2. 建立解的结构及能量函数

一开始必须先产生多组解来作为多点搜寻的基础，其解(质点)的结构，如(14)所示。在此电容器组开关状态与有载分接头位置是采用量子角度之型态，因此控制变数必须符合在 0 至 $\pi/2$ 之间。

$$\bar{\theta} = [\theta_{1,1}^C \cdots \theta_{n,h}^C \cdots \theta_{N_c,24}^C \theta_1^{Tap} \cdots \theta_h^{Tap} \cdots \theta_{24}^{Tap}] \quad (14)$$

其中 $\theta_{n,h}^C$ 为第 n 个电容器在第 h 小时开关状态相对应的量子角度； θ_h^{Tap} 为第 h 小时有载分接头位置相对应的量子角度。

文中的能量函数，是包括目标函数以及加入限制式的处罚函数，若是有任何解是违反限制条件，就会给定一个惩罚函数项，使得违反限制条件的解所对应之能量函数值变的较大。相反的，如果解没有违反任何限制条件，则能量函数中就没有任何惩罚函数项，其相对应的能量函数值就越小，其数学式表示如下：

$$E = \sum_{h=1}^{24} P_{loss,h} + \sum_{j=1}^4 \gamma_j \times pf_j \quad (15)$$

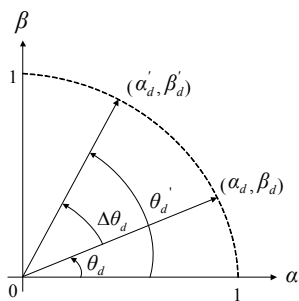


Figure 1. Quantum rotation gate
图 1. 量子旋转闸

其中

E : 能量函数。

γ_j : 一数值为正的常数。

pf_j : 违反限制条件的惩罚函数，包含式(2)到式(5)。至于式(6)及式(7)，执行电力潮流程式即可满足。

3.3. 量子启发式引力搜寻法的求解步骤

以量子启发式引力搜寻法作配电系统的虚功率及电压控制，求解步骤流程如图 2 所示，详细步骤说明如下：

步骤 1: 输入资料

输入馈线上每个汇流排每个小时的实功率及虚功率负载资料、主变压器的电抗标么值，以及馈电线上每区段上的阻抗标么值、二次侧并联电容器组的容量值以及馈电线上并联电容器组的容量值，并且设定引力参数等资料。

步骤 2: 产生初始解

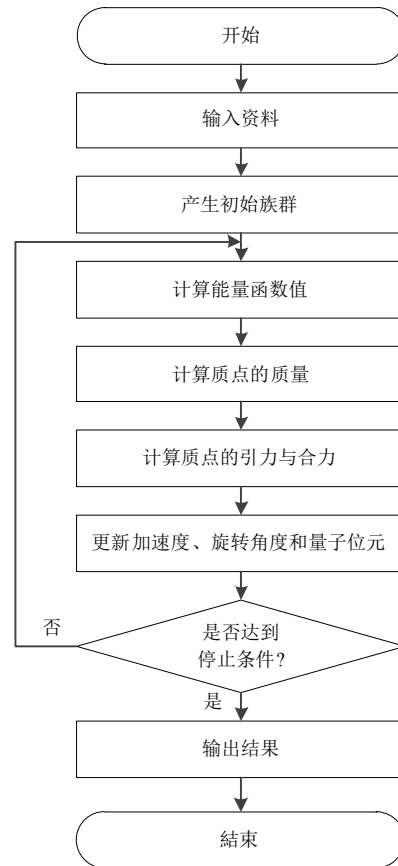


Figure 2. Flowchart for solving the problem by the proposed QGSA method
图 2. 量子启发式引力搜寻法的求解步骤流程图

一开始必须产生多组解来作为多点搜寻的基础。首先根据电容器开关最大切换次数 4 次，将 24 小时平均分成 4 个时段，在各个时段内投入相同的电容器随机状态之量子角度型态，而每个小时有载分接头位置的量子角度之型态是随机产生，使其建构出如(14)式的初始解，来产生群体。由于控制变数采用量子角度之型态，因此控制变数必须符合在 0 至 $\pi/2$ 之间。第 i 个质点(解)的控制变数之量子角度型态表示为：

$$\bar{\theta} = [\theta_{1,1}^C \cdots \theta_{n,h}^C \cdots \theta_{Nc,24}^C \theta_1^{Tap} \cdots \theta_h^{Tap} \cdots \theta_{24}^{Tap}] \quad (16)$$

$i = 1, 2, \cdots, N_a$

其中 N_a 为质点的数量。

步骤 3：计算能量函数

首先经由解码动作，将量子角度型态的控制变数转成电容器开关状态与有载分接头位置，其数学描述如下所示：

$$C_{n,h}(t) = \text{round}\left(\frac{\theta_{n,h}^C(t)}{\pi/2}\right) \quad (17)$$

$$Tap_h(t) = \text{round}\left(\frac{\theta_h^{Tap}(t)}{\pi/2} \times (Tap_{\max} - Tap_{\min})\right) + Tap_{\min} \quad (18)$$

其中 $C_{n,h}(t)$ 为第 t 次迭代时，质点的控制变数 $\theta_{n,h}^{Tap}(t)$ 经由(17)式解码动作后，电容器的开关状态； $Tap_h(t)$ 为第 t 次迭代时，质点的控制变数 $\theta_h^{Tap}(t)$ 经由(18)式解码动作后，有载分接头的位置； Tap_{\max} 与 Tap_{\min} 分别为有载分接头的位置的上限与下限。

有了所有电容器在各小时的开关状态及有载分接头在各小时的位置后，接着执行电力潮流程式，再利用(15)式计算出各质点的能量函数值。

步骤 4：计算质点的质量

在问题中各质点的质量是以能量函数值来表示，描述如下：

$$m_i(t) = \frac{E_i(t) - \text{worst}(t)}{\text{best}(t) - \text{worst}(t)} \quad (19)$$

$i = 1, 2, \cdots, N_a$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^{N_a} m_j(t)} \quad (20)$$

$$\text{best}(t) = \min(E_1(t), E_2(t), \cdots, E_{N_a}(t)) \quad (21)$$

$$\text{worst}(t) = \max(E_1(t), E_2(t), \cdots, E_{N_a}(t)) \quad (22)$$

其中 $E_i(t)$ 和 $M_i(t)$ 分别表示第 t 次迭代时第 i 个质点的能量函数值和质量； $\text{best}(t)$ 和 $\text{worst}(t)$ 表示在第 t 次迭代时所有质点中最佳适应值和最差适应值。

步骤 5：计算质点的引力与合力

各质点各元素的引力与合力，计算如下：

质点 j 作用在质点 i 的引力表示为：

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \times \frac{M_j(t) \times M_i(t)}{D_{ij}(t) + \varepsilon} \times (\theta_j^d(t) - \theta_i^d(t)) \quad (23)$$

$$i = 1, 2, \cdots, N$$

其中

$$G(t) = G_0 \times e^{-\delta \frac{t}{T}} \quad (24)$$

$G(t)$ 表示在第 t 次迭代时的引力常数， T 为设定的最大迭代次数，本文设 $G_0 = 10$ ， $\delta = 1$ ；

$D_{ij}(t) = \|\bar{\theta}_i(t) - \bar{\theta}_j(t)\|_2$ ， $D_{ij}(t)$ 表示质点 i 与 j 之间的欧几里得距离(Euclidean distance)； ε 是一极小常数，防止分母为 0。

在量子启发式引力搜寻法中，作用在第 i 个质点的第 d 个元素上之作用力，为质点 i 与其所有其他质点之间作用力的总合，其大小表示成：

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_a} \text{rand}_j \times F_{ij}^d(t) \quad (25)$$

$$d = 1, 2, \cdots, N$$

其中 rand_j 表示在 0 至 1 之间的一个随机值，主要功能是增加随机特性。

步骤 6：更新加速度、旋转角度和量子位

更新质点是依据量子计算原理与引力搜寻法的观念，旋转更新量子位，根据牛顿第二定律，第 t 次迭代时质点 i 的第 d 个元素之加速度为：

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_i(t)} \quad (26)$$

$$d = 1, 2, \cdots, N$$

有了各质点的加速度后，接着根据下列式子计算各质点的旋转角度：

$$\Delta\theta_i^d(t+1) = \text{rand}_i \times \Delta\theta_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (27)$$

$$i = 1, 2, \cdots, N_a; d = 1, 2, \cdots, N$$

其中 $\Delta\theta_i^d(t+1)$ 为 $\theta_i^d(t)$ 的旋转角度; $rand_i$ 表示在 0 至 1 之间的一个随机值。

每个质点的量子位依据量子旋转闸的旋转角度, 更新至新的量子位, 数学式如下所示:

$$\begin{bmatrix} \alpha_i^d(t+1) \\ \beta_i^d(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_i^d(t+1)) & -\sin(\Delta\theta_i^d(t+1)) \\ \sin(\Delta\theta_i^d(t+1)) & \cos(\Delta\theta_i^d(t+1)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_i^d(t) \\ \beta_i^d(t) \end{bmatrix} \quad (28)$$

$i = 1, 2, \dots, Na; d = 1, 2, \dots, N$

其中 $\alpha_i^d(t)$ 与 $\beta_i^d(t)$ 分别为质点 i 的第 d 元素 $\theta_i^d(t)$ 相对应的一对量子位。

步骤 7: 判断是否达到停止条件

判断群体中的最低能量函数值的解, 是否持续数次迭代仍然无法得到更好的解, 或是达到最大迭代次数时, 则停止演算。否则回到步骤 3, 直到满足停止演算的条件为止。

4. 实例测试与分析

本文以量子启发式引力搜寻算法来作配电系统中虚功率及电压控制问题。以一 30 个汇流排, 23 kV 测试系统^[3]来作为验证测试, 如图 3 所示。其中主变压器二次侧的电压为 23 kV, 各汇流排电容器装设资料如表 1。一天当中系统总负载量, 如图 4 所示。本文中量子启发式引力搜寻算法的群体个数设为 30 个;

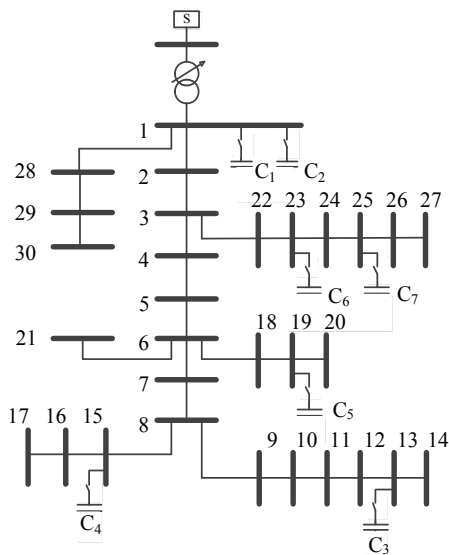


Figure 3. Single-line diagram of 30 - bus test system
图 3. 30 个汇流排测试系统线路图

Table 1. Data for capacitors
表 1. 各汇流排装设之电容器资料

电容器	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
置放点(汇流排)	1	1	13	15	19	23	25
容量(kVAR)	900	600	600	600	300	900	900

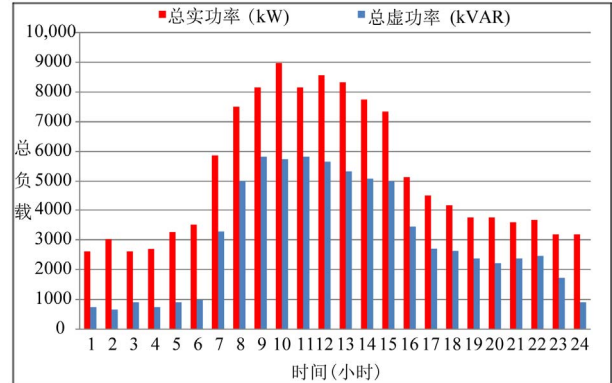


Figure 4. Daily load
图 4. 一天 24 小时之总负载

停止条件设定连续未再改善的迭代次数为 30, 或是最大迭代次数为 200, 符合条件, 则停止演算。所有的算法的程序都是透过 MATLAB 7.0 来完成, 采用的执行系统为个人电脑 Intel core2 Duo E8300 2.83 GHz, 3 GB RAM。

首先来观察系统中电压的情况, 而系统中电压最低的汇流排为汇流排 14, 其调度前后的 24 小时电压, 如图 5 所示。由图 5 显示, 在调度前, 指的是各个小时有载分接头位置均在 0, 而所有电容器均未投入, 由于负载的影响, 此汇流排的电压在第 7 小时到第 16 小时低于限制值 0.95 标么。经由本文的方法调度后, 可以大大的改善电压过低情形。表 2 为利用本文所提出之量子启发式引力搜寻算法(QGSA)作配电系统中, 虚功率及电压控制后所得的结果。表 2 中显示出 24 小时的电容器组开关状态以及主变压器有载分接头位置变动的情形。由调度结果可以看出, 电容器在尖峰时段投入, 来提供较多的虚功率, 加上有载分接头适当的调整, 得以降低馈线损失及改善电压。而有载分接头和电容器组的最大总切换次数都在限制的次数内。而调度前与调度后的馈电线上的实功率损失, 如图 6 所示, 从图 6 可以发现到, 调度后馈电线上的实功率损失能有效的被降低。

图 7 为调度前与调度后流经主变压器之总虚功率

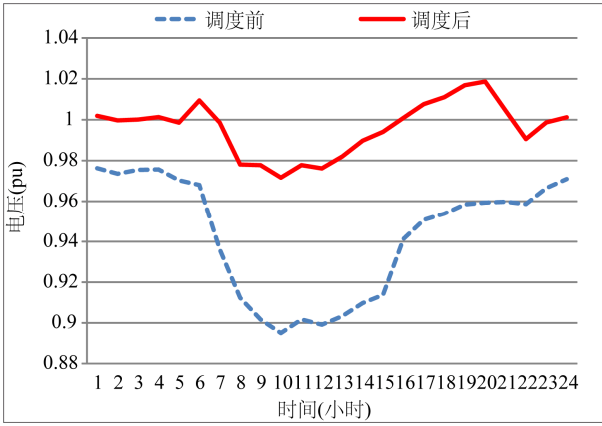


Figure 5. Voltages on bus 14
图 5. 系统中电压最低的汇流排(汇流排 14)之电压

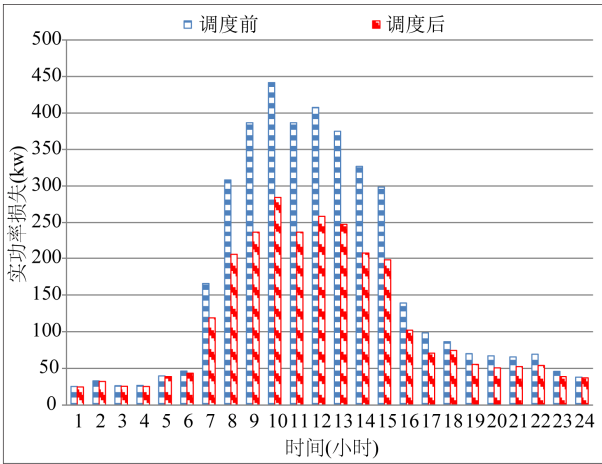


Figure 6. Comparison of active power losses
图 6. 调度前与调度后系统实功率损失的比较

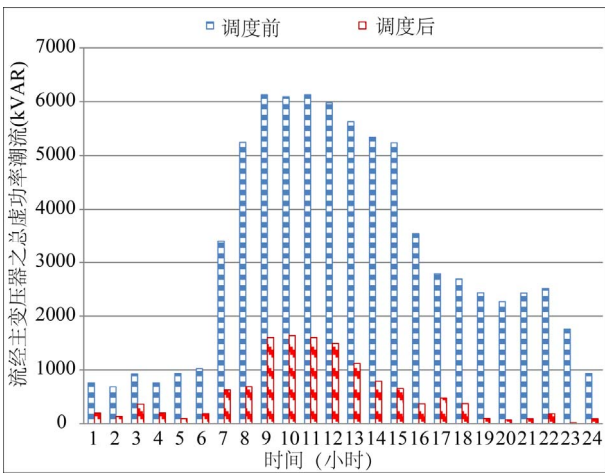


Figure 7. Comparison of reactive power flow through main transformer
图 7. 调度前与调度后流经主变压器之总虚功率潮流的比较

潮流的比较。从图 7 可以发现到，调度后主变压器之

Table 2. Dispatching schedules of ULTC tap position and capacitors from the proposed QGSA approach
表 2. 以 QGSA 方法所得之调度结果

小时	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	Tap
1	0	1	0	0	0	0	0	-2
2	0	1	0	0	0	0	0	-2
3	0	1	0	0	0	0	0	-2
4	0	1	0	0	0	0	0	-2
5	0	1	0	0	1	0	0	-2
6	0	1	0	0	1	0	0	-3
7	1	1	0	1	1	1	1	-3
8	1	1	1	1	1	1	1	-3
9	1	1	1	1	1	1	1	-4
10	1	1	1	1	1	1	1	-4
11	1	1	1	1	1	1	1	-4
12	1	1	1	1	1	1	1	-4
13	1	1	1	1	1	1	1	-4
14	1	1	1	1	1	1	1	-4
15	1	1	1	1	1	1	1	-4
16	1	1	1	0	1	1	0	-3
17	1	1	1	0	1	0	0	-3
18	1	1	1	0	1	0	0	-3
19	1	1	1	0	1	0	0	-3
20	1	1	1	0	1	0	0	-3
21	1	1	1	0	1	0	0	-2
22	1	1	0	0	0	0	1	-2
23	1	0	0	0	0	0	1	-2
24	1	0	0	0	0	0	0	-2
开关操作次数	2	2	2	2	2	2	4	4

总虚功率潮流可以有效地被降低。

接着利用基因算法(GA)、差分进化法(DE)及引力搜寻法(GSA)三种方法作相同系统的测试,和本文所提出的量子启发式引力搜寻法(QGSA)作一比较,其四种方法的群体个数都是 30 个,所得之结果如图 8。图 8 为一天的总实功率损失,随迭代次数变化的情形,分别使用 GA、DE、GSA 及 QGSA 作收敛之比较。图 8 显示出在相同的初始条件下, QGSA 相较于其它三种方法,可以较快速的收敛到较佳的解。

另外,将这四种方法执行 100 次不同初始解的比

较, 所得之结果如表 3 及表 4 所示。表 3 为 100 次所得之总实功率损失范围的统计次数, 表 4 为 100 次中的最佳解、最差解与平均值的展现。从表 3 可以发现到以 QGSA 求得最低总实功率损失(范围介于 2650 kW~2750 kW 之间)有 57 次, 而 GA、DE 与 GSA 求得最低总实功率损失(范围介于 2650 kW~2750 kW 之间)各有 0 次、0 次与 1 次。表 4 可以看到, 本文应用的 QGSA 比传统的 GA、DE 与 GSA 在总实功率损失的表现上, QGSA 所得的平均总实功率损失较 GA、DE 与 GSA 所得的平均总实功率损失为低, 因此显示 QGSA 较 GA、DE 与 GSA 能搜寻到较佳的解。

5. 结论

本文应用量子启发式引力搜寻算法来做配电系统虚功率及电压控制问题, 其目的在于希望得出一天之中有载分接头位置及电容器的最佳调度排程。从模拟的结果显示出本文所使用的方法, 确实可以降低馈

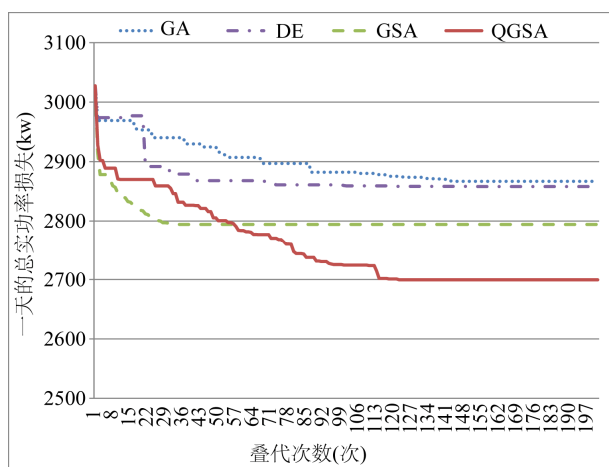


Figure 8. Comparison of performance form GA, DE, GSA and QGSA
图 8. GA, DE, GSA 及 QGSA 的收敛之比较

Table 3. Statistical results for different initial solutions with 100 trials
表 3. 执行一百次不同初始解所得结果的次数统计

方法	在不同总实功率损失范围的次数				
	2650~2700 (kW)	2700~2750 (kW)	2750~2800 (kW)	2800~2850 (kW)	2850 (kW) 以上
GA	0	0	2	27	71
DE	0	0	27	32	41
GSA	0	1	32	64	3
QGSA	6	51	38	5	0

Table 4. Comparison of results for different initial solutions with 100 trials

表 4. 执行一百次不同初始解所得结果的比较

方法	总实功率损失(kW)	
GA	最佳解	2797
	最差解	2993
	平均值	2923
	标准差	25
DE	最佳解	2751
	最差解	2970
	平均值	2840
	标准差	51
GSA	最佳解	2743
	最差解	2863
	平均值	2808
	标准差	21
QGSA	最佳解	2681
	最差解	2835
	平均值	2746
	标准差	32

电线上总实功率损失与流经主变压器的虚功率潮流, 达到节约能源的目的、并有效的控制各汇流排电压于限制内。

应用量子启发式引力搜寻算法做配电系统虚功率及电压控制问题, 由于控制变数以量子位(Q-bit)方式编码, 比起传统二位编码与实数型编码, 有更好的多样性, 增强质点的搜索能力, 让解可以有效的搜寻到全域最佳解, 并防止提早收敛至区域解。在本文的测试实例中, 与传统的基因算法、差分进化法及引力搜寻法作比较, 由实验结果可以看出, 本文所提的量子启发式引力搜寻算法, 确实可以更容易搜寻到较佳的解。

参考文献 (References)

- [1] R. H. Liang, C. K. Cheng. Dispatch of main transformer ULTC and capacitors in a distribution system. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 625-630.
- [2] R. H. Liang, Y. S. Wang. Main transformer ULTC and capacitors scheduling by simulated annealing approach. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2001, 23(7): 531-538.
- [3] Z. Hu, X. Wang, H. Chen and G. Taylor. Volt/VAr control in

- distribution systems using a time-interval based approach. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(5): 548-554.
- [4] G. W. Kim, K.Y. Lee. Coordination control of ULTC transformer and STATCOM based on an artificial neural network. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 580-586.
- [5] F. A. Viawan, D. Karlsson. Combined local and remote voltage and reactive power control in the presence of induction machine distributed generation. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 2003-2012.
- [6] J. Y. Park, S. R. Nam and J. K. Park. Control of a ULTC considering the dispatch schedule of capacitors in a distribution system. 2007, IEEE Transactions on Power Systems, 22(2): 755-761.
- [7] A. Ulinuha, M. A. S. Masoum and S. M. Islam. Optimal scheduling of LTC and shunt capacitors in large distorted distribution systems using evolutionary-based algorithms. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 434-441.
- [8] M. B. Liu, C. A. Canizares and W. Huang. Reactive power and voltage control in distribution systems with limited switching operations. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 889-899.
- [9] R. H. Liang, Y. K. Chen and Y. T. Chen. Volt/Var control in a distribution system by a fuzzy optimization approach. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(2): 278-287.
- [10] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatto and M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. Science, New Series, 1983, 220(4598): 671-680.
- [11] J. Kennedy, R. C. Eberhart. Particle swarm optimization. IEEE International Conference on Neural Networks, 1995, 4: 1942-1948.
- [12] M. Dorigo, V. Maniezzo and A. Colorni. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 1996, 26(1): 9-41.
- [13] K. V. Price. Differential evolution: A fast and simple numerical optimizer. IEEE Conference on Proceedings of North American Fuzzy Information Processing, 1996: 524-527.
- [14] M. Gen, R. Cheng. Genetic Algorithms and Engineering Optimization. New York: Wiley, 2000.
- [15] K. H. Han, J. H. Kim. Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(6): 580-593.
- [16] E. Rashedi, H. Nezamabadi-Pour and S. Saryazdi. GSA: A gravitational search algorithm. Information Sciences, 2009, 179(13): 2232-2248.