

电网综合补偿系统中智能控制算法的应用研究*

胡 鲜 秦华标 周敬泉 毕英满 袁 鹏

(华南理工大学电子与信息学院·广州, 510640)

摘要: 基于电网综合补偿系统的智能控制模型, 采用模糊控制和神经网络控制技术, 对电网中的功率因数亏损、电流三相不平衡等参数进行综合补偿. 以我校某区的配电采样数据进行仿真, 仿真结果为平均功率因数补偿前为 0.86953, 补偿后提高到 0.99908; 电流平均三相不平衡度补偿前为 6.3921%, 补偿后减少 2.7467%.

关键词: 电网; 综合补偿; 神经网络; 模糊 c 均值(FCM)聚类算法

文献标识码: A

Applied Research of Intelligent Control Algorithm on Comprehensive Compensation System for Electric Network

HU Xian, QIN Huabiao, ZHOU Jingquan, BI Yingman and YUAN Peng

(College of Electronic & Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510640, P. R. China)

Abstract: This article introduces the way to synthetically compensate reactive power and three phase current imbalance of power-supply system, which is on base of the intelligent control model of power-supply system. Fuzzy control and neural network technique are applied. We have done emulation using the sample data of power-supply system of some building of our school. Before it is compensated, the average power factor is 0.86953 and current imbalance percent is 6.3921%. After it is compensated, the average power factor is 0.99908 and current imbalance percent is 2.7467%.

Key words: electric power network; comprehensive compensation; neural network; fuzzy c -means (FCM) clustering algorithm

1 引言(Introduction)

提高供电质量和用电水平是我国电力工业的一个亟待解决的问题. 为了提高电网质量, 人们研制了多种调节补偿装置, 如 SVC(静止无功补偿器)、ASVG(静止无功发生器)、TCPS(可控移相器)、APF(有源滤波器)等, 它们主要基于硬件更新. 随着控制系统的不断发展, 国外出现了神经网络自适应静态 VAR 控制器^[1]、基于专家系统的电力调度系统^[2]等, 国内则停留在理论探讨上, 而且只是针对影响电网质量某一两项指标进行研究. 电力系统是一个非常复杂的网络系统, 影响供电质量的因素众多, 各个参数又相互关联, 必须寻求除了硬件更新、采用先进的电路设计外, 还要运用新的智能控制理论和技术, 以解决电网中所存在的多变量控制、系统的解耦、系统辨识、多目标全局寻优、非线性问题的求解等问题. 涉及的智能控制理论和技术包括: 模糊控制(系

统输出控制)、神经网络控制(系统输出控制和电力系统建模与参数辨识)、专家控制(系统仿人智能决策), 以及学习控制、分层递阶智能控制等等.

2. 智能综合补偿系统建模及综合补偿方法 (Model building of intelligent comprehensive compensation system and comprehensive compensation process)

在电网的综合补偿中, 必须对电压、无功、不平衡、谐波等多项因素进行综合补偿, 其中尤以无功功率和三相不平衡的补偿在理论计算与设备密不可分. 对于电网中存在的大量低功率因数的不对称线性负荷的补偿, 既要平衡三相不对称性, 消除电流中的负序分量, 又要进行功率的补偿.

电网综合补偿系统结构如图 1 所示, 主要由补偿参数计算、智能控制算法和外围补偿电路三个部分组成.

* 基金项目: 国家自然科学基金(69772007)和华南理工大学青年科学基金资助项目.

收稿日期: 1999-09-27; 收修稿日期: 2000-03-22.

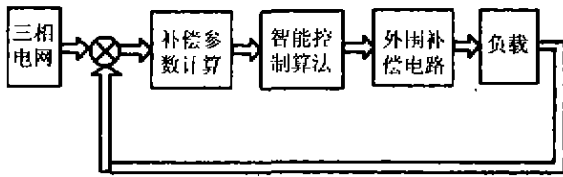


图1 电网综合补偿系统结构图

Fig. 1 Structure of comprehensive compensation system

2.1 补偿参数计算 (Calculation of compensating parameter)

在一般情况下,供电系统输出端的电压都可以作为平衡的情况来考虑,则设电源电压是平衡的,按文献[3],采用三相电路的对称分量分析方法,电网的无功功率和负载电流的三相不平衡将同时得到补偿,经推导补偿导纳为:

$$\begin{bmatrix} B_p^{AB} \\ B_p^{BC} \\ B_p^{CA} \end{bmatrix} = \frac{1}{3V} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -\sqrt{3} \\ 1 & -2 & 0 \\ 1 & 1 & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Im}(I_1^{+}) \\ \text{Im}(I_1^{-}) \\ \text{Re}(I_1^{-}) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中 B_p^{AB} , B_p^{BC} , B_p^{CA} 分别为 A, B, C 三相补偿电容导纳的理论值, I_1^{+} , I_1^{-} 分别为负载的正、负序电流, Im , Re 为复数的虚部和实部运算符。

根据式(1),即可以求得补偿电容的理论值,该理想补偿电容网络能满足: a) 补偿网络是纯无功的,不消耗有功功率,这样,由于补偿,才不影响电源与负荷之间的有功功率交换; b) 补偿后供电电源的电压和电流是对称的,即用对称分量法分析,供电电流不含负序、零序分量; c) 补偿后的功率因数为 1。

综合考虑补偿器对控制的灵活性、相平衡能力、限制过电压能力、补偿器成本等的要求,补偿器的外围补偿电路采用并联电容器组投切的方案。

2.2 模糊聚类 (Fuzzy clustering)

在实际外围补偿电路中,因为每个时刻计算出的所需补偿电容的理想值不可能都能满足,而只能采用分组电容投切的控制方式来实现补偿,所以,首先确定电容的分组,然后通过某种控制算法决定哪组电容的投切,以期获得最佳补偿效果。

为了确定外围补偿电路中电容的分组,首先对需补偿的电网对象进行采样监测,取得 n 组进入电网的三相电流的数据,依据式(1),计算出与之对应的 n 组补偿电容的理想值,再确定实际电路中补偿电容的分组。

我们知道,每组理想补偿电容的值 (C_{AB} , C_{BC} , C_{CA}) 是一个三维向量,所以可以把它看成三维空间中的一个点,此三维空间的 X, Y, Z 方向分别表示 AB, BC, CA 相间的理想补偿电容,则 n 组理想补偿

电容的值就在三维空间中构成了一个不均匀分布的空间立体。

现在的任务是如何根据这些数据来将它们划分到 c 个子集(类)内,并且找出每个子集(类)的中心点,这有多种算法可以实现,如前馈神经网络分类、核函数概率神经网络分类、模糊极小极大神经网络分类、模糊 c 均值分类算法等,模糊 c 均值聚类算法是一种经典的模糊聚类算法,已经在模式识别领域中得到了广泛和成功的应用,其缺点主要是在大数据集的情况下,计算时间太长,考虑到以前成功应用的经验和本聚类研究涉及到的数据集不大,这里采用该算法,而且,模糊 c 均值(FCM)聚类算法能自动得出聚类的每一个数据点对聚类所得的每一类的隶属度,在下一步神经网络的训练中,需要该隶属度矩阵作为其样本数据的训练输出。

利用模糊 c 均值(FCM)聚类算法,对空间中的 n 个点进行聚类,并找出每一类的中心点,如果一共分成 c 类,则这 c 个中心点所代表的电容值即为实际电路中的分组电容值,聚类结果中,还能得到该立体中每一个点对聚类所得的每一类的隶属度矩阵 U ,矩阵 U 将用作下一步神经网络的训练输出。

模糊 c 均值算法简称为 FCM 算法,通过对式(2)的目标函数 J 的迭代优化来获取对数据集的模糊分类。

$$J(U, V) = \sum_{k=1}^c \left(\sum_{i=1}^n (u_{ik})^m (d_{ik})^2 \right). \quad (2)$$

式中

$$(d_{ik})^2 = \|x_k - v_i\|^2 = (x_k - v_i)^T A (x_k - v_i). \quad (3)$$

矩阵 A 为对称正定矩阵, $m \in [1, \infty)$ 为模糊加权指数; $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为数据集, $X \in \mathbb{R}^P$, \mathbb{R}^P 为 P 维空间, n 为数据项数, c 为类别数, $2 \leq c \leq n$. 隶属度矩阵 $U \in [u_{ik}]_{c \times n}$ 满足 $u_{ik} \in [0, 1]$ 和 $\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1, \forall k$. $V = \{v_1, v_2, \dots, v_1, \dots, v_c\}$ 为 c 个聚类中心集合, $v_i \in \mathbb{R}^P$.

2.3 神经网络控制 (Neural network control)

确定 c 个中心点作为补偿电容的分组值后,对于电网中的任一时刻的状态,由式(1)求出与该状态相对应的理想补偿电容值,再用神经网络算法求出该值对原来模糊聚类所得的每一类的隶属度;最后再找出该电容值对某一类的隶属度为最大,则将该类的中心点所对应的电容组投入电路,即可获得较佳补偿效果。

我们采用一个含两个隐层的神经网络,网络结构如图2所示:

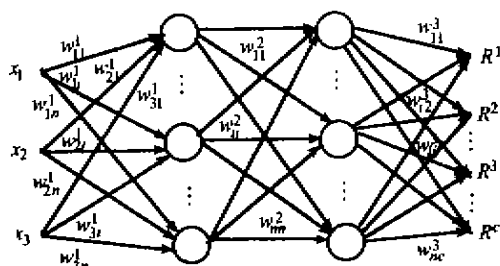


图2 神经网络结构图

Fig. 2 Structure of neural network

该神经网络中,第一层为输入层,含有三个神经元,对应已计算出的三相信理想补偿电容值;第二层和第三层为隐层,用来作为误差传递;第四层为输出层,含有 c 个神经元,对应输入点对模糊聚类每一类的隶属度.网络中各层的神经元通过其权值 w_{ij} 相连.使用 Sigmoid 函数:

$$O = \frac{1}{1 + \exp(-\sum x_i w_i - t)} \quad (4)$$

式中, O 表示输出, x_i 为输入, w_i 为权值, t 是阈值.

将神经网络的输出与期望输出比较,得到神经网络的最终误差后,依据式(5)将此误差传播到网络的其他节点:

$$E_n = O_n(1 - O_n) \sum_j w_{nj} E_j \quad (5)$$

式中, E_n 和 E_j 分别表示第 n 和第 j 个节点的误差, O_n 表示第 n 个节点的输出, w_{nj} 表示第 n 个节点和第 j 个节点之间的权值.

然后按照(6)更新权值:

$$w_{jk}^{i+1}(\text{new}) = w_{jk}^i(\text{old}) + \alpha E_k^{i+1} x_{jk} \quad (6)$$

式中, w_{jk}^i 表示第 i 层第 j 个节点与 $(i+1)$ 层的第 k 个节点之间的连接权; α 表示学习速率, E_k^{i+1} 表示第 $(i+1)$ 层第 k 个节点的误差, x_{jk} 表示从第 i 层第 j 个节点到 $(i+1)$ 层第 k 个节点的输入.

神经网络的训练数据集即为原来的采样点的数据.对该神经网络,训练样本输入即为采样点的理想补偿电容值,而训练样本的输出即为这些点对聚类的每一类的隶属度,该隶属度矩阵 U 已在 FCM 算法的结果中得出.一旦神经网络已经完善,则它的最终结构就能用来决定任一输入数据对每一类的隶属度值.

3 仿真结果(Simulation result)

通过我校某区配电室的采样监测,我们得到

1105 个样本电流的数据.由式(1),计算每个样本点的理想补偿电容值.我们从这 1105 个点中随机抽取 500 个点作为训练数据.其分布空间如图 3 所示.

用 FCM 算法对 500 个点进行聚类,共分 8 类,在 MATLAB 环境下进行仿真.

首先,利用 MATLAB 的模糊控制工具箱,得到该 8 类的中心点数值,以及每个点对该 8 类中每一类的隶属度,组成一个隶属度矩阵 U .

第二,建立一个 3 维输入,8 维输出的神经网络,它有两个隐层,第一个隐层有 14 个神经元,第二个隐层有 18 个神经元.利用 500 个样本点的电容数值(即 500 个三维向量)作为神经网络的训练输入,这 500 个点对于模糊聚类中所得的 8 个类的隶属度值(即模糊聚类时所得的 U 矩阵,为 500 个 8 维向量)作为神经网络的训练输出.

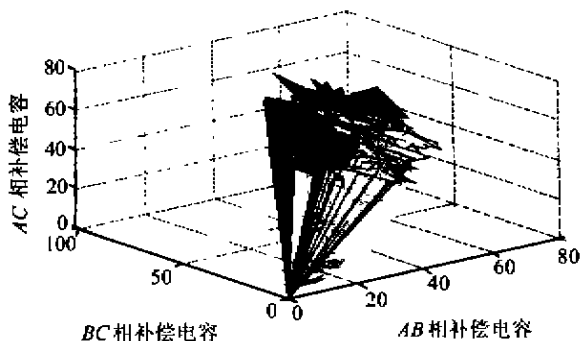


图3 采样点理论补偿电容分布空间图(单位为kvar)

Fig. 3 Distribution space of perfect capacity value of sample data (unit:kvar)

第三,训练该神经网络,使之能在一定误差范围内输出任一对电容值相对于聚类的每一类的隶属度值.

最后,按照上述的控制算法,以采样所得的全部 1105 个点作为验证数据,可得电网三相功率因数和电流三相不平衡度的补偿效果如图 4 所示.

对此补偿前和补偿后的平均功率因数和平均电流三相不平衡度的数值如表 1 所示.

表 1 综合补偿系统仿真结果表

Table 1 Simulation result of comprehensive compensation system

	补偿前 数值	理想补 偿数值	实际补偿 后数值
平均功率因数	0.86953	1	0.99908
平均电流三相 不平衡度/(%)	6.3921	1.8773e-014	2.7467

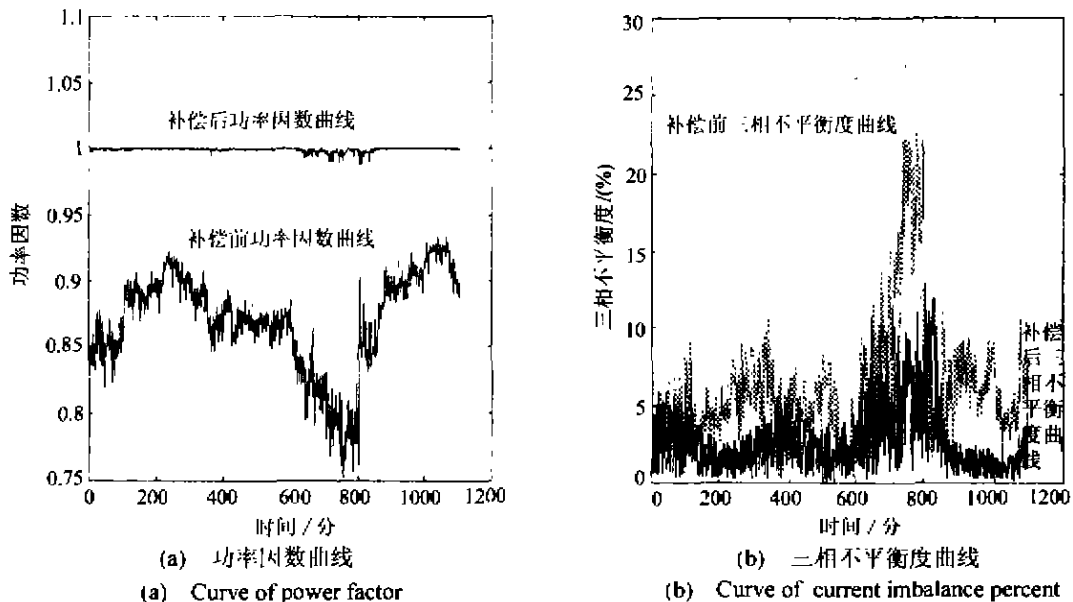


图4 电网智能综合补偿系统仿真曲线

Fig. 4 Simulation curve of comprehensive compensation system

4 结论(Conclusion)

本文所述的智能控制算法,初步解决了电网参数复杂,补偿系统难以建模、难以控制的问题,并且能综合补偿电网的多项性能指标.通过仿真结果可以看出,电网平均功率因数在补偿后达到 0.99908,已经很接近理想值 1;而平均电流三相不平衡度补偿后为 2.7467%,也比补偿前的 6.3921%有较大改善.

参考文献(References)

- [1] El-Sadek M Z, El-Saad G and Abo-El-saud M. Variable structure adaptive neural network static VAR controller [J]. Electric Power Systems Research, 1998, 45(3): 65 - 68
- [2] Niebur. Expert systems for power system control in Western Europe [J]. Dagmar IEEE Control Systems Magazine, 1991, 11(4): 31 - 35
- [3] Miller T J E and Hu Guogeng. Control of Reactive-Load for Power System [M]. Beijing: Water Conservation and Power Publishing House, 1990 (in Chinese)
- [4] Wang Shitong. Neural Fuzzy System and Its Application [M]. Beijing: Aviation and Astroravigation University Publishing House, 1998 (in Chinese)
- [5] Wang Yaonan. Intelligent Control System—Fuzzy Logic·Expert System·Neural Networks Control [M]. Changsha: Hunan University Publishing House, 1996 (in Chinese)
- [6] Horikawa S. On fuzzy modeling using fuzzy neural networks with BP

algorithm [J]. IEEE Trans. Neural Networks, 1992, 43(2): 11 - 13

- [7] Sun Zengche, Zhang Zaixin and Deng Zhideng. Intelligent Control Theory and Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House; Nanning: Guangxi Science Technology Publishing House, 1997 (in Chinese)
- [8] Jin Longzhang and Ding Yushan. Practical Technology for Power Network Reactive-Load Compensation [M]. Beijing: China Water Conservation and Power Publishing House, 1997 (in Chinese)
- [9] Xie Weixin and Liu Jianzhang. Combination of c -means and fuzzy means - double layer FCM fast algorithm [J]. Fuzzy System and Mathematics, 1992, 6(2): 23 - 25 (in Chinese)
- [10] Huang Deishuang. Neural Network Pattern Recognition Theory [M]. Beijing: Electronic Industries Publishing House, 1996 (in Chinese)

本文作者简介

胡 鲜 1975 年生, 2000 年 3 月毕业于华南理工大学, 并获得工学硕士学位. 现在广东省电信科学技术研究院工作. 研究方向: 智能控制.

秦华标 1967 年生, 工学博士. 现在华南理工大学电子与信息学院工作. 研究方向: 电路与系统, 计算机系统.

周敬泉 1943 年生, 副教授. 现在华南理工大学电子与信息学院工作. 研究方向: 智能控制, 仪表, 计算机应用.

毕英满 1942 年生, 高级工程师. 现在华南理工大学科技开发公司工作. 研究方向: 电力电子技术.

袁 鹏 1972 年生, 工学硕士. 现在华南理工大学电子与信息学院工作. 研究方向: 智能控制, 仪表, 计算机应用.