

基于 ANN 测量分析法的配网无功补偿电容器的优化布置

王铁松

(浙江泰鸽安全科技有限公司, 浙江 杭州 310017)

摘要: 随着感性负载在工业配电系统中不断增加, 无功补偿电容器越来越多的投入到配电网中。详细分析了工业配电网中无功补偿电容器谐波产生的机理及其危害。介绍了 ANN 测量分析法, ANN 算法采用 ADALINE 模型和 LMS 学习机制, 在谐波测量上有精度高、收敛速度快的优点。基于该测量分析法提出了工业配电网无功补偿电容器的优化布置方案。并且在 PSCAD 仿真平台上搭建了小型工业配电网仿真模型, 通过仿真验证了该方案的可行性和经济性。

关键词: 电力电容器; 谐波; PSCAD; ANN; 优化布置

Optimization location of power correction capacitor of distribution network based on the ANN measurements and analysis method

WANG Tie-song

(Zhejiang Tager Safe Technology CO., LTD, Hangzhou 310017, China)

Abstract: With continuous increase of inductive load in industrial power distribution systems, more and more power factor correction capacitors are used in distribution network. The mechanism and harm of power factor correction capacitor harmonics in industry distribution network are illustrated in detail. The ANN measurements and analysis method is introduced, which uses ADALINE model and LMS learning mechanism and has high accuracy and fast convergence in harmonic measurement. Based on which, the strategy of reactive compensated capacitors optimization location for industrial distribution system is proposed. More over, a simulation model of a small industry distribution network is set up on the PSCAD platform, and the feasibility and economical efficiency of the proposed strategy are verified by simulation.

Key words: power capacitor; harmonic; PSCAD; ANN; optimization location

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)02-0061-04

0 引言

在工业配电系统中, 存在着大量的旋转设备以及功率转换设备等感性负载, 这些负载消耗无功功率。感性负载的特性会导致系统的功率因数降低, 较低的功率因数对电力系统的运行产生许多不利影响, 其会降低电网的输电效率, 同时会增大输电线路、变电站和配电网的建设容量, 并且会使电压不易控制^[1]。因此, 在电网规划建设和运行中, 都会采取很多措施改善功率因数^[2]。

目前, 用于改善功率因数的设备有很多, 包括电力电容器, 同步调相机, 静态无功补偿器 (SVC) 以及基于无功补偿器的功率整流器。由于电力电容成本低, 容量高, 其作为无功补偿设备在电力系统得到了广泛应用^[3]。

近来, 随着电力电子设备技术的不断发展和改

进, 越来越多的采用电力电子元件设计的能量转换设备被应用于电力系统如整流器、变速驱动装置、不间断电源 (UPS) 等。由于这些设备非线性的输入特性, 它会产生大量的谐波^[4]。它们以谐波电流源或者电压源的形式存在于配电系统中。当谐波源频率与系统的自然频率一致时将会发生谐振。每个电力系统都存在一个自然频率, 该频率是整个系统阻抗与无功补偿电容值的函数。如果某个谐波源的频率与系统的自然频率接近, 将会产生很大的谐振电流。虽然, 电力电容器不是相应的谐波源, 但是它对谐波电流起到一定的放大作用。因此目前有很多方法用于避免此类谐振的产生, 但是大部分方法需要加装额外的设备, 增加了投资^[5]。通过优化电容器的布置, 可以减少或避免电容器谐振的影响, 也不需要增加其他设备, 经济效果比较明显。

ANN 算法采用 ADALINE 模型和 LMS 学习机

制，在谐波测量上有精度高、收敛速度快的优点，并且易于在 DSP 上实现，本文基于 ANN 算法测量分析的无功补偿电容优化布置方案在实际工程上有很好的实用性^[6]。

1 电力电容器的谐波分析^[7]

1.1 谐波电流的产生

图 1 和图 2 给出了一个简化的带有电力电容器的工厂电力系统的结构图与电路图，该系统中，由于用电设备是非线性负荷以及母线电压受周边非线性负荷的影响而产生畸变，因此系统中包括两个谐波源，一个是非线性负荷，另一个是畸变的母线电压。为了简化分析，非线性负荷简化为谐波电流源，用 I_{fh} 表示，畸变的母线电压简化为谐波电压源，用 V_{mh} 表示。

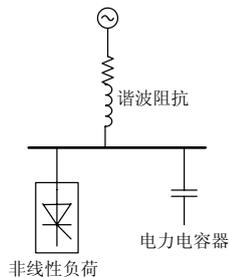


图 1 含电力电容器的系统简化结构图

Fig.1 Configuration of the simplified industrial system with power capacitor

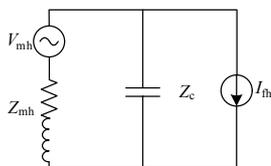


图 2 含电力电容器的系统简化电路图

Fig.2 Circuit of the simplified industrial system with power capacitor

如图 2，若只考虑非线性负荷的影响，将谐波电压源看作短路，则注入到电力电容器的谐波电流可以表示如下式 (1) 示。

$$I_{ch1} = \frac{Z_{mh}}{Z_c + Z_{mh}} I_{fh} \quad (1)$$

若只考虑谐波电压的影响，将谐波电流源看作断路，则注入到谐波电容器的谐波电流可以表示如下式 (2) 示。

$$I_{ch2} = \frac{V_{mh}}{Z_c + Z_{mh}} \quad (2)$$

则由电路叠加原理可知，流入电力电容器的谐波电流为

$$I_{ch} = I_{ch1} + I_{ch2} \quad (3)$$

1.2 谐振谐波电流

由式 (1)、式 (2) 可知，当它们的分母即 $Z_c + Z_{mh}$ 接近于 0 时，将会有很大的谐波电流注入到电力电容器中，该电流可能是谐波源电流的很多倍。同时，电容器的两端电压也被放大很多倍。这种谐振将使电容器因过电压或者过电流受损害。由以上分析可以推导出谐振频率如式 (4) 示。

$$\omega = 1/\sqrt{L_s C} \quad (4)$$

在 PSCAD 仿真平台上对谐振现象进行仿真，仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统参数

Tab.1 Parameters of simulation system

电力电容	200 μF	谐波阻抗	2.026 mH, 0.05 ohm
谐波频率	0~4 000 Hz	谐波电压源幅值	120 V
谐波电流源幅值	10 A		

仿真结果如图 3 所示。

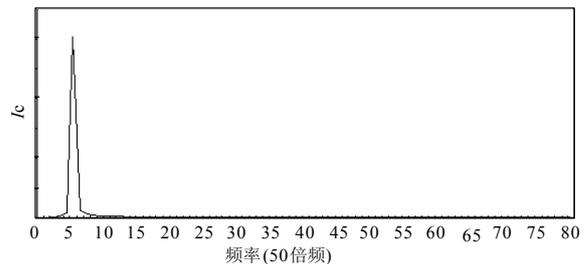


图 3 电容器谐波电流波形图

Fig.3 Response of power capacitor current versus frequency

由图 3 可知，在非线性负荷产生的谐波电流源以及电压畸变所产生的谐波电压源作用下，在谐振频率附近谐波电流被放大。并且，由于电力电容的阻抗与频率成反比，这为谐波电流提供了一个低阻通道。在工业配电系统中，相邻非线性负荷所产生的谐波电流会流入电力电容器。因此，在应用电容器无功补偿设计时，需对系统谐波进行分析研究。否则，安装电力电容器将会增大谐波电流，严重时甚至会损害电容器。

2 ANN 测量分析法及无功补偿电容器优化布置

2.1 ANN 算法介绍^[8]

ANN 谐波分析算法本质上是 ADALINE^[5]神经网络的训练过程，设采集的向量信号为

$$\mathbf{X}(k) = [\sin(2\pi k / N_s) \cos(2\pi k / N_s) \sin(4\pi k / N_s) \dots \cos(2\pi k / N_s) \dots \sin(2N\pi k / N_s) \cos(2N\pi k / N_s)]^T \quad (4)$$

其中： N_s 为采样频率； k 是迭代时间。

设权向量为 $\mathbf{W}(k)$ ，其实采用 Widrow-hoff 定律自动更新方式如式 (5) 示。

$$\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k) + \frac{\alpha e(k) \mathbf{X}(k)}{\mathbf{X}^T(k) \mathbf{X}(k)} \quad (5)$$

其中： $\mathbf{W}(k) = [W_1(k) \ W_2(k) \ W_3(k) \ \dots \ W_{2N}(k)]^T$ ； α 是学习系数； $\mathbf{X}(k)$ 是在 k 时刻输入的训练向量； $e(k) = y(k) - y'(k)$ 是在 k 时刻偏差； $y(k)$ 是 k 时刻输入信号的实际幅值； $y'(k)$ 是 k 时刻输入信号的估计幅值。在第 k 次迭代后，偏差为 $e(k) = y(k) - y'(k)$ 。当 ADALINE 学习网络完全学到输入信号后（如收敛），该偏差将变为 0，此时

$$y(k) = \mathbf{W}_0^T \mathbf{X}(k) \quad (6)$$

其中， \mathbf{W}_0^T 是收敛后的权系数，这样该模型就能准确地预测输入波形的非正弦部分。

在训练误差趋近于 0 后，相应的各谐波傅里叶系数可以通过权系数向量获得即

$$A_n = [A_1 \sin \phi_1 \ A_1 \cos \phi_1 \ \dots \ A_N \sin \phi_N \ A_N \cos \phi_N] \quad (7)$$

其中， A_n ， ϕ_n 分别是 n 次谐波的幅值与相角。第 n 次谐波的参数可以表达为

$$A_n = \sqrt{W_0^2(2n-1) + W_0^2(2n)} \quad (8)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left[\frac{W_0(2n-1)}{W_0(2n)} \right] \quad (9)$$

2.2 优化布置方案

由以上分析可知，无功补偿电容器组与系统阻抗存在一个自然频率，而在工业配电系统中，存在很多非线性元件，这些元件会产生不同频率的谐波，当某段谐波源频率与系统自然频率接近时，会发生谐振，这不仅会大大影响电容器的工作效率，也会影响电容器的安全。

改变无功补偿电容器的安装位置，可以改变配电系统网络结构，从而可以改变系统的自然频率。从整个谐波系列考虑，以基于 ANN 测量分析法得到的谐波电流畸变率 THD 为目标函数，通过优化可以找到使 THD 最小的无功补偿电容器安装位置组合。该安装位置组合可以有效地避免谐振发生在谐波电流源较强的部分，从而可以在不增加其他设备（如滤波器）的情况下，大大降低流过电容器的谐波电流。

3 算例分析

如图 4 所示，测试网络采用小型工厂配电网，负荷侧线电压为 380 V，负荷包括一个六脉动整流器、一个可调速电动机、一个水泵电动机、一个增压电动机和相应的照明加热纯电阻负荷。无功补偿电容器组总容量为 400 kvar，其中为 2×100 kvar、 3×50 kvar 和 2×25 kvar。

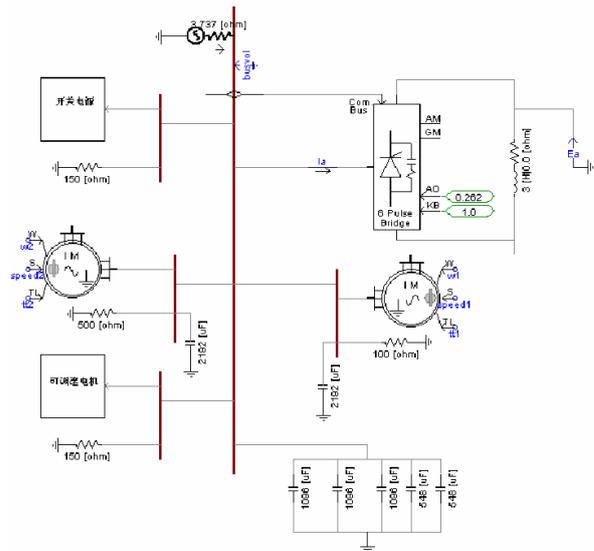


图 4 仿真电路模型

Fig.4 Circuit of simulation system

以往无功补偿电容器组全部加装到 380 V 母线上。根据本文提出的无功补偿电容器组优化布置方案，以 380 V 母线上的电流谐波畸变率 THD 为目标函数，通过测试比较，最终得到电容器的优化布置方案为：在水泵电动机和增压电动机侧分别加装 100 kvar 无功补偿电容器，另外电容器加装到中压母线侧。图 5 及表 2 给出无功补偿电容器组优化布置前后的测试结果对比。

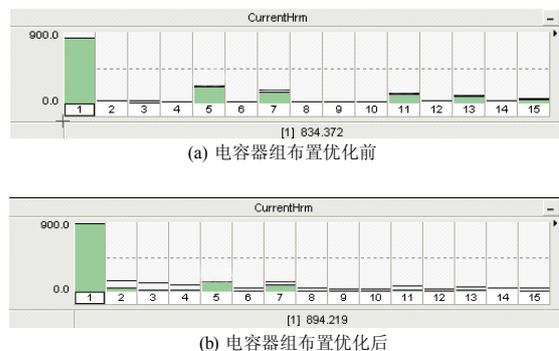


图 5 380 V 母线谐波电流仿真波形图

Fig.5 Simulation curve of 380 V bus harmonic current

表 2 仿真结果电流对比表

Tab.2 Comparison of current simulation results

电容器布置	I_1	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}	I_{15}	$THD_i/\%$
优化前	834.37	5.43	180.98	112.35	4.22	75.52	55.23	22.85	27.90
优化后	894.22	6.56	95.13	56.36	7.23	58.45	26.32	12.88	14.41

注: $THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{15} (\frac{I_h}{I_1})^2} \times 100\%$, 为谐波总畸变率

不进行电容器布置优化时,从图 5 (a) 可以看出,在非线性负载以及母线畸变电压的作用下,通过电力电容器的电流所含谐波比较多,谐波电流畸变严重。由表 2 可知,此时,电流总谐波畸变率为 27.90%,超过对电流谐波总畸变率的要求。进行电容器布置优化后,从图 5 (b) 可以看出,电容器电流中谐波相对较少,电流总谐波畸变率为 14.41%,由表 3 可知谐波电压也有很好的改善,谐波抑制效果比较理想。

表 3 仿真结果电压对比表

Tab.3 Comparison of voltage simulation results

电容器布置	U_1	U_3	U_5	U_7	U_9	U_{11}	U_{13}	U_{15}	$THD_u/\%$
优化前	226.89	0.23	7.49	6.58	0.23	1.36	0.45	0.16	4.44
优化后	233.77	0.45	3.97	3.97	0.24	4.44	1.17	0.17	3.11

4 结论

工业配电系统中,对通过电力电容的谐波电流分析时,可以将谐波源可分为两类,一是母线电压畸变引起的谐波电压源,另一个是相邻非线性设备运行所产生的谐波电流源。如果在谐波源作用下,系统阻抗与电容器发生谐振,将大大增加通过电容器的谐波电流,从而损害电容器。以基于 ANN 测量分析法得到的谐波电流畸变率 THD 为目标函数,找到电容器组的最优布置,可以有效地减弱或避免谐振的影响,通过仿真验证了该方法的有效性。ANN 算法由于其精确性高,计算量小,易于在 DSP 上实现的优点,使本文推荐的方法在工程上有很好的应用价值。

参考文献

[1] 王葵,李建超,蒋丽,等. 谐波电流对低压配电网的影

响分析[J]. 继电器, 2008, 36 (7): 31-35.

WANG Kui, LI Jian-chao, JIANG Li, et al. Influence analysis of harmonic current on low-voltage distribution power system[J]. Relay, 2008, 36 (7): 31-35.

[2] 周勇,赵慧光,王文峰. 无功补偿电容器谐波过载分析[J]. 继电器, 2005, 33 (16): 93-95.

ZHOU Yong, ZHAO Hui-guang, WANG Wen-feng. Harmonic overloading analysis of reactive compensation capacitor[J]. Relay, 2005, 33 (16): 93-95.

[3] Wakileh G J. 电力系统谐波-基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政,译. 北京:机械工业出版社,2003. Wakileh G J. Power system: harmonics fundamentals, analysis and filter design[M]. XU Zheng, trans. Beijing: China Machine Press, 2003.

[4] Valluvan K R, Kandasamy A S, Natarajan A M. A survey of voltage and current harmonics in various industries connected to a state electrical grid[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2008, 6(3): 801-816.

[5] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2002.

WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonics suppressing and reactive power compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.

[6] 金明,刘远龙. 用于电力系统谐波分析的 ANN 算法[J]. 电网技术, 1997, 17 (5): 52-54.

JIN Ming, LIU Yuan-long. A new ANN harmonic analysis algorithm for power system[J]. Power System Technology, 1997, 17(5): 52-54.

[7] 王竟昌. 供电系统谐波[M]. 北京:中国电力出版社, 1998.

WANG Jing-chang. Power system harmonics[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

[8] 金雄飞,乐秀璠. 电网谐波测量方法评述[J]. 继电器, 2003, 31 (8): 11-14.

JIN Xiong-fei, LE Xiu-fan. A survey on measuring method for harmonic of network[J]. Relay, 2003, 31 (8): 11-14.

收稿日期: 2010-01-25

作者简介:

王铁松(1965-),男,高工,主要从事机电设计研究与电气安全评价工作。E-mail: tiesong85374689@sina.com

(上接第 60 页 continued from page 60)

收稿日期: 2010-01-19; 修回日期: 2010-03-13

作者简介:

白玮莉(1986-),女,硕士研究生,主要从事于电气设计

工作; E-mail: bwl1986@163.com

刘志刚(1975-),男,博士、教授、博士生导师,主要研究方向为现代信号处理及其在电力系统中的应用;

彭权威(1982-),男,硕士研究生,主要从事于电力系统调度自动化工作。