

基于 NIC 的无功补偿器实现方法

王 磊,曹玲玲,姚艳松,闫 昭

(华北电力大学 电力工程系,河北 保定 071003)

摘要: 目前,广泛应用于无功补偿的电容器不能连续地进行无功补偿,当无功负荷经常变化时,电容器的频繁投切会给电网及其自身带来一系列问题。阐述了一种基于负阻抗变换器 NIC(Negative Impedance Converter)特性的新型无功补偿器的工作原理及电路结构,在此基础上提出一种通过 NIC 将电感转换为可连续调节的电容的方法。该方法补偿的关键在于 NIC 可以将电感转变成电容。在 NIC 的输出端口连接电感,在 NIC 的输入端口变成等效电容,通过连续改变 NIC 同相输入端电阻的阻值实现对等效电容的电容值的连续调节。通过具体的电路模型验证了预期补偿效果,并用 Workbench 对其进行仿真。结果表明,该无功补偿器可以连续调节无功大小,使功率因数稳定在 0.93~0.96。

关键词: 负阻抗变换器; 无功补偿; 可调电容器

中图分类号: TM 714.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)08-0033-03

由于电网中存在大量的无功负荷给电网带来一定负担^[1],因此,怎样进行无功补偿成为人们关注的问题。本文针对现有无功补偿设备不能连续调节的特点,基于负阻抗变换器 NIC(Negative Impedance Converter)的原理,提出了一种新的无功补偿方法。应用该方法可以实现对电力系统无功的连续调节。

1 无功补偿现状

静止无功补偿装置(SVC)是专指使用晶闸管的静止无功补偿装置,它包括晶闸管控制电抗器 TCR(Thyristor Controlled Reactor)和晶闸管投切电容器 TSC(Thyristor Switched Capacitor)型静止无功补偿装置,以及这两者的混合装置(TCR+TSC),或者晶闸管控制电抗器与固定电容器 FC(Fixed Capacitor)或机械投切电容器 MSC(Mechanically Switched Capacitor)混合使用的装置,如 TCR+FC、TCR+MSC 等^[2-4]。

随着电力技术的进一步发展,20 世纪 80 年代以来,出现的静止无功补偿装置采用自换相变流电

路,也称静止无功发生器 SVG(Static Var Generator)。尽管静止无功发生器可以提供无功补偿,但是它控制起来十分复杂,不便于无功的补偿^[5]。

2 NIC 原理及实现

NIC 是随着近代电路理论和电工电子技术的发展,在实践中研制出的新型元件,它的研制在理论上及实践中都有极其重要的意义。

2.1 NIC 原理

NIC 是一个二端口元件^[6],其符号如图 1 所示,端口特性^[7]可用下列参数确定:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

或

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 K 为正实常数。

从式(1)可见:输入电压 U_1 经过传输后成为 U_2 ,但 $U_1 = U_2$,因此电压大小和方向没有改变,但电流 I_1 经传输后变为 KI_2 ,即电流经传输后改变了

方向,故该式定义的 NIC 为电流反相型 NIC。

从式(2)可以看出,经传输后电压变为 $-KU_1$,改变了方向,电流却不改变方向。这种 NIC 称为电压反相型 NIC。NIC 把正阻抗变为负阻抗,原理如图 2 所示。

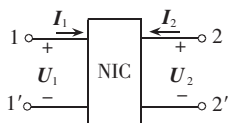


图 1 负阻抗变换器原理图

Fig.1 The principle of NIC

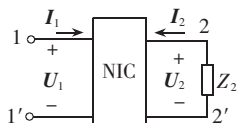


图 2 负阻抗变换器工作原理图

Fig.2 The working principle of NIC

在端口 2-2' 接上阻抗 Z_2 ,从端口 1-1' 看进去的输入阻抗为 Z_1 可作如下计算。

设 NIC 为电流反向型,由式(1)得:

$$Z_1 = U_1 / I_1 = U_2 / (K I_2) \quad (3)$$

又由于 $U_2 = -Z_2 I_2$ (根据指定参考方向),得:

$$Z_1 = Z_2 / K \quad (4)$$

即输入阻抗 Z_1 是负载阻抗乘上 $1/K$ 的负值。因此,该二端口有将一个正阻抗变为负阻抗的功能,也即当端口 2-2' 接上电阻 R 、电感 L 和电容 C 时,则在端口 1-1' 将变为 $-R/K$ 、 $-L/K$ 、 $-KC$ 。

2.2 NIC 实现

用运算放大器组成的负阻抗变换器^[8]如图 3 所示。

假设运算放大器是理想的,由于其同相输入端和反相输入端电位相等 ($U_+ = U_-$),即存在“虚短路”,输入阻抗为无穷大,即两端输入电流为零 ($I'_1 = I'_2 = 0$),则有

$$U_1 = U_2, \quad I_1 = \frac{U_1 - U_0}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_2 - U_0}{R_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_1 - U_0}{U_2 - U_0} \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2}{R_1}$$

$I_1 = (R_2 / R_1) I_2$, 又 $I_2 = -U_2 / Z_2$, 所以 1-1' 端输入阻抗:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{R_2 I_2} R_1 = \frac{R_1}{R_2} \frac{U_2}{-U_2} Z_2 = -\frac{R_1}{R_2} Z_2 \quad (5)$$

3 NIC 构成可变电容器

基于负阻抗变换的原理^[9-10],可以制作出可调电容器,其基本电路图如图 4 所示。

负载为电感, R_1 为可变电阻器,从 1-1' 端口看进去的等效阻抗为

$$Z_1 = -(R_1 / R_2) j\omega L = -jK\omega L$$

令 $Z_1 = -j1/(\omega C)$, 则 $K\omega L = 1/(\omega C)$, 即

$$C = 1/(K\omega^2 L) \quad (6)$$

故从 1-1' 端口看的阻抗为容性的,该电容的值为 $C = 1/(K\omega^2 L)$, 由于 K 值大小可以通过改变 R_1 的阻值实现,故该电路相当于一个容值可调的电容器。

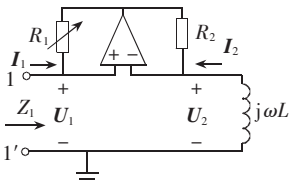


图 4 可调电容器基本电路图

Fig.4 The basic circuit of adjustable capacitor

4 基于可调电容器的无功补偿装置原理

利用可调电容器组成无功补偿装置的原理图如图 5 所示。

它的 2 个阻抗分别为 $-jK\omega L_2$ 和 $R + j\omega L_1$ 的并联,等效阻抗为

$$Z = \frac{-jK\omega L_2 (R + j\omega L_1)}{R + j\omega L_1 - jK\omega L_2} = \frac{K^2 \omega^2 L_2^2 R}{R^2 + \omega^2 (L_1 - KL_2)^2} + j \frac{K \omega^3 L_1 L_2 (KL_2 - L_1)}{R^2 + \omega^2 (L_1 - KL_2)^2} = R' + jX' \quad (7)$$

$$K = R_1 / R_2$$

$$R' = \frac{K^2 \omega^2 L_2^2 R}{R^2 + \omega^2 (L_1 - KL_2)^2}, X' = \frac{K \omega^3 L_1 L_2 (KL_2 - L_1)}{R^2 + \omega^2 (L_1 - KL_2)^2}$$

从式(7)可见:若使 Z 为纯感性负载,只需 $X' = 0$, 即 $KL_2 - L_1 = 0$, 故取 $R_1 = KR_2 = L_1 R_2 / L_2$ 即可,从式(7)也可看出若负载发生变化,只要调节 R_1 为合适的值就可以提高功率因数。在具体电路模型实验中,功率因数可以维持在 0.93~0.96。

4.1 基于 NIC 的无功补偿装置原理

基于 NIC 的无功补偿装置的结构如图 6 所示。

通过无功检测电路测量出电路的功率因数,并送入单片机,与设定值进行比较,作出判断后通过相应驱动电路控制 R_1 阻值,使功率因数维持在一个较高水平。 R_1 可以采用数字电位器或采用其他方式控制。

4.2 基于 NIC 的无功补偿装置特点

通过以上分析可见该无功补偿方式有以下 4 个特点:

- 可以通过连续调节来吸收无功功率;
- 响应速度快,只要改变 R_1 的阻值即可,响应速度取决于 R_1 的调节速度;
- 控制简单,只需要对 R_1 进行控制,不用对电路其他部分控制;
- 电路结构简单、成本低。

目前,集成运放的输入电压最高可达 500 V,因此该装置可用于 220 V 电路,也可以用于 380 V 电路,若采用变压器进行阻抗变换,还可用于电压更高的电路。

5 仿真分析

用 Workbench 工具对该电路设计进行仿真,下面是各个阶段的仿真波形。

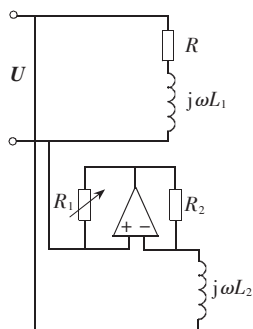


图 5 无功补偿装置原理图
Fig.5 Principle of reactive power compensator

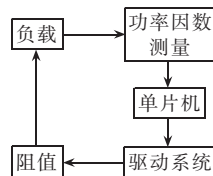


图 6 结构示意图
Fig.6 The structure of NIC-based reactive power compensator

a. 当负载为纯电感且不加无功补偿器时, 电流超前电压, 见图 7。

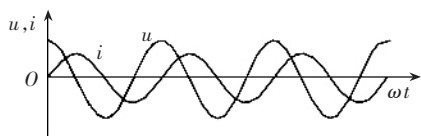


图 7 补偿前的电压、电流波形
Fig.7 Voltage and current wave-forms before compensation

b. 加上无功补偿器进行一定的无功补偿, 电压与电流的相位差缩小, 见图 8。

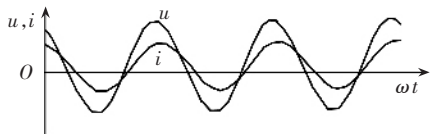


图 8 经过一定补偿后的电压、电流波形
Fig.8 Voltage and current wave-forms after some compensation

c. 当无功补偿器的无功补偿调到一定值时, 电压与电流的相位差近似重合, 达到理论的无功补偿的目的, 见图 9。

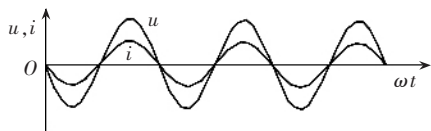


图 9 进行完全补偿后的电压、电流波形
Fig.9 Voltage and current waveforms after complete compensation

6 结语

通过以上理论分析与电路设计, 基于负阻抗变换器的无功补偿器装置是完全可以实现的。该无功补偿器具有可以连续调节无功功率的作用, 实现了负载无功功率的连续补偿, 具有一定的理论与经济意义。另外, 该装置还具有控制与结构简单的特点, 便于实际器件的研制与开发应用。

参考文献:

- [1] 袁丽珍. 无功补偿技术在配电网上的应用[J]. 宁德师专学报, 2005, 20(1): 62-65.
YUAN Li-zhen. Application of reactive power technique to distribution networks[J]. Journal of Ningde Teachers College, 2005, 20(1): 62-65.
- [2] 伍红辉, 陈烛雁. 无功功率补偿技术及其应用研究[J]. 机械, 2005, 1(8): 13-16.
WU Hong-hui, CHEN Zhu-yan. Reactive power compensation and application[J]. Machinery, 2005, 1(8): 13-16.
- [3] 高晶晶, 赵玉林. 电网无功补偿技术现状及发展趋势[J]. 东北农业大学学报, 2004, 26(5): 125-130.
GAO Jing-jing, ZHAO Yu-lin. Overview of the present status and development tendency of var compensation technology of power system[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2004, 26(5): 125-130.
- [4] 张刘春, 韩如成, 张守玉. 无功补偿装置的现状和发展趋势[J]. 太原重型机械学院学报, 2004, 8(1): 32-35, 41.
ZHANG Liu-chun, HAN Ru-cheng, ZHANG Shou-yu. Present situation and development tendency of the equipment of reactive power compensation[J]. Journal of Taiyuan Heavy Machinery Institute, 2004, 8(1): 32-35, 41.
- [5] 范萍, 韩水. 配电网无功优化及无功补偿装置[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [6] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [7] 董武世. 阻抗变换器的负阻特性分析[J]. 湖北师范学院学报, 1993, 11(6): 59-63.
DONG Wu-shi. Analysis of negative impedance for impedance converter[J]. Journal of Hubei Normal University, 1993, 11(6): 59-63.
- [8] 方之祺, 刘津渝. 用运算放大器实现负阻抗的制约条件[J]. 北京工业大学学报, 1991, 15(1): 87-93.
FANG Zhi-zhen, LIU Jin-yu. Restrictive conditions for realizing the negative impedance with OP-AMP[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 1991, 15(1): 87-93.
- [9] 蔡钧. 运算放大器负阻抗变换性能的仿真分析[J]. 现代电子技术, 2002, 21(8): 59-61.
CAI Jun. Simulation analyze for performance of negative impedance converter with operational amplifiers[J]. Modern Electronic Technique, 2002, 21(8): 59-61.
- [10] 项经猛. 负阻抗变换器的实现与应用[J]. 襄樊学院学报, 2002, 14(5): 58-61.
XIANG Jing-meng. A study of the realization and application of negative impedance converter[J]. Journal of Xiangfan University, 2002, 14(5): 58-61.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

王 磊(1982-), 男, 河北定州人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析运行与控制(E-mail: zizaidaocaoren_2@163.com);
曹玲玲(1982-), 女, 河北灵寿人, 硕士研究生, 研究方向为电力市场。

Realization of reactive power compensation based on NIC

WANG Lei, CAO Ling-ling, YAO Yan-song, YAN Zhao

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Because capacitors used in var compensation can not change continuously, when load fluctuates, frequent switching of capacitor may result in troubles to power system and itself. The working principle and structure of the reactive power compensator based on NIC (Negative Impedance Converter) are introduced. A method to convert inductance into continuously adjustable capacitance via NIC is put forward, which is the key technique of NIC-based reactive power compensator. The inductor connected to the output port of NIC is equivalent to a capacitor at the input port, and its value changes continuously according to the continuously changeable resistance connected to the input port at the same phase. Detail circuit model is built up and simulated with Workbench to validate the expected compensation effect. Results show that the reactive power can be adjusted continuously and the power factor can be controlled between 0.93 and 0.96.

Key words: NIC; reactive power compensation; adjustable capacitor