

节能电器运行对电网影响的研究

随着全球各国日益重视节能减排,变频器、节能灯和可控硅交流调压器等节能电气设备大量使用,这些设备在减小电能消耗的同时,对电网形成一定程度的污染,会影响电能计量的准确度。针对此,在分析多种节能设备机理的基础上,研究仿真了变频器、逆变器运行的情况,包括对电网电压、电流的影响;为在大量节能设备运行环境下,保证高性能的电能计量创造有利条件,具有重要意义。

李贺龙¹ 甄冲² 王锐¹ 刘佳¹ 唐东升² 郑宝²/1.中国电力科学研究院
2.华北电力大学电气与电子工程学院



李贺龙/工程师

0 引言

随着全球各国日益重视节能减排,各种节能电气设备大量投入使用,对电力系统的负荷特性和电能计量的准确度产生影响。节能装置与传统用电设备相比,其工作原理更加复杂,大量使用时影响系统的负荷特性,同时新型节能电气设备一般采用电力电子器件作为控制元件,在快速开关控制时难免对电网产生扰动和谐波污染,从而影响电能计量的准确度。针对节能设备原理,仿真设备运行对电网的污染情况,为节能电器大量应用环境下保证电能准确度的研究创造有利条件。

1 节能电器的主要类型和工作机理分析

节能电器种类繁多,目前要包括变频器、节能灯、可控硅交流调压器、无功补偿、永磁电动机、多速电动机和开关磁阻驱动系统(<SRD)等,这些设备能够降低用电负荷的电能消

耗,但工作机理差异很大。

1.1 变频器

变频器^[1-2](Variable-frequency Drive, VFD)应用微电子技术变频技术,主要由整流、检测单元微处理单元、滤波、制动单元逆变和驱动单元等组成,是一种通过改变电动机工作电源频率的途径来实现操纵交流电动机的电力控制设备。通过改变电源的频率来实现改变电源电压的目标,进而达到调速、节能的目的。此外,变频器还有过电流、过电压和过载保护等很多的保护功能。

1.2 节能灯

节能灯^[3]是一种高效荧光灯,依靠电子镇流器提供驱动。电子镇流器是一种将50 Hz工频交流电源转换成高频交流电源的变换设备,存在多种设计方案。但其基本工作原理大体相同,50 Hz交流电源通过一种射频干扰滤波器,全波整流有源或者无源功率因数校正器后,变为直流电源。通过DC/AC转换器,输出20~100 kHz的高频交流电源,加到与其连接的LC串联谐振电路的加热灯丝,同时会在电容上产生谐振的高压,加在荧光灯管两侧,使荧光灯管发生放电变为导通状态,再一次进入发光状态,此时高频率电感器会有限制电流变大的作用,保证灯电流和灯电压能够满足荧光灯管正常工作需要。此外,常增设异常保护、浪涌电压与电流保护及温度保护等各种保护电路,以提高荧光灯的安全性和可靠性。

1.3 可控硅调压节能

采用可控硅实现的调压技术,是

关键词/Keywords

节能电器 ·
电能质量 ·
变频器 ·
节能灯 ·
电能计量 ·

以电力电子及部分高频器件组成的电路产生控制信号,对可控硅实现导通和关断,最终对交流系统实现可控制的快速导通,其相关的技术包括电力调整器、晶闸管调压器和晶闸管调整器等。主要优点是响应速度快、效率高、体积小、无机械噪声与磨损和重量轻等,但对于实现高压及大容量有一定的难度。

1.4 动态无功补偿

无功功率补偿,在电力供电线路系统中特变是需要消耗大量无功功率的,起着及其重要的作用。其主要可实现提高线路中的功率因数,降低线路中的无功电流,进而进一步降低供电系统中的损耗,提高供电线路的效率。所以根据线路的实际情况合理地选择补偿方式及容量,可以最大程度地减少线路的损耗,提高线路供电质量。相反,如果非合理科学地使用无功补偿,有可能导致供电系统电压发生波动,产生大量谐波,甚至产生系统谐振危机供电安全。

1.5 永磁电动机

稀土永磁电动机^[4]是利用稀土材料制作的永磁体,代替电动机原有靠导线产生的励磁,因而降低了电动机的损耗,又因具有结构设计简单,运行故障低;体积较小,质量比普通同容量的电动机轻,同时稀土永磁电动机形状和尺寸设计上比较灵活多变,因而可应用到国防、航空航天、工业、农业和日常生活等领域。

稀土永磁材料具有较好的磁性能,其经过多样的优势充磁后就能建立非常强的永久性磁场,不需要任何其他设备为其提供电磁能量。利用稀土材料制成的稀土永磁电动机具有上述的优点,超过了传统的电励磁电动机无法达到的高效,能满足不同行业特殊的要求,如电梯拉伸电动机、汽车专用高效电动机和高效变频电动机等。

1.6 多速电动机

多速电动机是利用改变电动机极数的原理达到调速的目的,设计使用上通过改变定子绕组的连接方法或对不同的布线线圈通电,实现定子旋转磁场磁极对数的改变,从而得到电动机的不同转速。

双速电动机是从电动机设计方面出发,实现电动机的不同转速运行,满足需要不同转速运行的系统,达到节能的目的;从设计方法入手没有

其他电子控制,对电网污染极小,对于电能计量不会有任何干扰,但是由于一台电动机兼顾多种转速,因此电动机的效率就会有所降低。

1.7 开关磁阻电动机驱动系统(<SRD)

20世纪80年,由于电力电子技术,微计算机技术和精细控制技术的快速发展,使得开关磁阻电动机驱动系统^[5-6]得以实现并得到进一步的发展。电动机系统主要由位置和电流传感器、开关磁阻电动机、控制器和功率变换器组成。电动机运行过程中通过实时检测的转子位置、转速和电流等数据,然后根据给定的控制要求整合检测到的信息,实现不同要求的运行控制。整个系统运行可靠的重要组成部分是转子位置检测环节,其信号是对所有控制回路器件正确判断的主要依据,同时为速度控制环节提供反馈信号。

2 节能电器主要应用情况分析

在目前的节能设备中,应用最广泛的是变频器,其主要应用在风机类设备和泵类设备的变频调速中,实现了安全、高效率生产的目的,有效降低了能源的浪费,减少了能源消耗。变频器节能技术得到国家的大力支持与推广,成为我国重点的节能推广技术。经过长期的实践和应用证明,变频器节能技术应用在国内的水泵类设备和风机类设备的变频调速驱动控制,能够有效降低能源的消耗,达到节约能源的效果。

3 变频器的模型与工作方式

3.1 变频器的主电路模型

随着现代工业自动化程度的逐步提高,变频器也得到越来越普遍的应用。变频器主要应用在调节电动机速度,有两方面应用。

图1为变频器主电路模型,整流部分采用不可控的三相全桥整流电路。在控制方面,采用120°导电型工作方式,即任一时刻相位不同的下桥臂组及上桥臂组中分别会有一个臂的功率元器件导通,换流时在下桥臂组或上桥臂组的组内依次进行,因此也称为横向的换流。按 VT_1 到 VT_6 的顺序每隔 60° 依次导通。功率器件导通的顺序为 VT_6 、 $VT_1 \rightarrow VT_1$ 、 $VT_2 \rightarrow VT_2$ 、 $VT_3 \rightarrow VT_3$ 、 $VT_4 \rightarrow VT_4$ 、 $VT_5 \rightarrow VT_5$ 、 $VT_6 \rightarrow VT_6$ 、 VT_1 ,每个状态持续 60° 。在电路运行时,任意时刻都只有

两个开关导通，一个在共阳极组，另外一个在共阴极组。每个周期中，每个元器件会依次导通 120°。在分析电路的运行过程时，忽视换流过程，假设 $VT_1\sim VT_6$ 为理想开关。

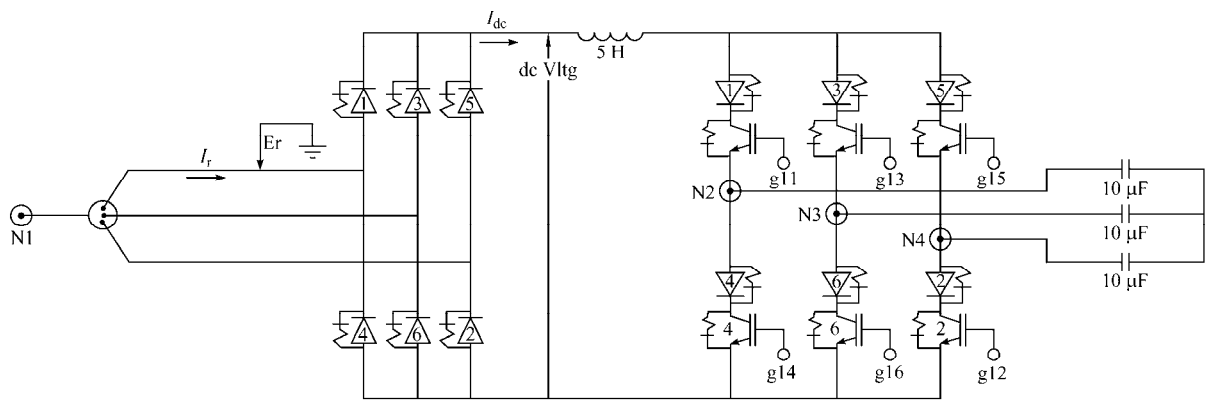


图 1 变频器主电路模型

3.2 变频器装置与工作方式

变频器变频方法有很多种，目前主流应用一般采用电流型 PWM 交流-直流-交流的变频方法^[2]，其主要特征如下。

- 1) 直流侧电流基本无脉动，直流回路呈现高阻抗。直流侧串联有大电感，相当于电流源。
- 2) 交流侧输出的电压波形、相位会因负载阻抗情况的不同而发生改变。电路中开关器件的功能仅是改变直流电流的流通路径，因此交流侧输出的电流波形表现为矩形波波，而且和负载阻抗角没关系。
- 3) 大电感为直流侧的滤波元件，可以使直流电流不会产生脉动，可当做恒流源。由于直流电流并不会在反馈无功能量时反向，因而不必向开关器件反并联二极管。当交流侧出现阻性、感性负载时，需要提供无功功率，这时直流侧电感器件起到缓冲无功能量的功能。

交-交变频器采用的开关元器件一般是晶闸管，基于电网系统中电压具有的特征，其自身会自动过零并变为负值，在交流电源上直接接上晶闸管，使晶闸管可以自然开关。但是这种方法存在会使用较多数量的晶闸管，电源频率会限制输出频率，而且会有复杂的主回路，一般要低于电网频率的一半。目前变频电源的主要形式是交-直-交变频方法。按照频率、电压的控制方式的差异，交-直-交变频电源有以下 3 种不同的形式。

- 1) 逆变器调频、可控整流器调压方式。如

图 2a 所示，其调频与调压功能分别在两个环节上实施，通过控制电路协调配合，控制方便，结构简单。由于装置输入环节采取可控整流的方法，当在低频、低压情况下运行时，移相触发角非常大，导致输入功率因数很低，每个周期换流两次的逆变器多采用晶闸管型 2 阶梯波，器件开关有着较低频率，导致输出含有大量谐波，IGBT 可控器件的出现使得 PWM 控制成为可能，可以极大地改善其工作性能，但需要较高的成本。

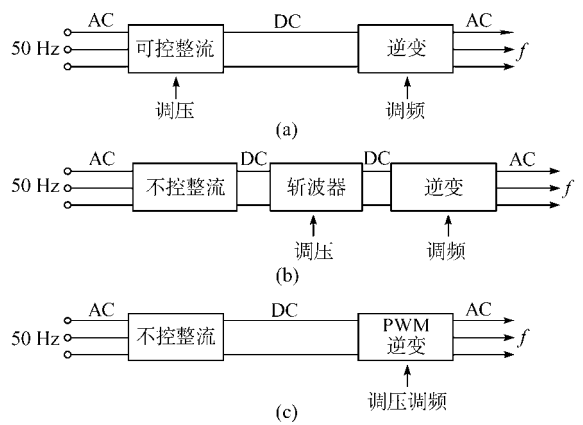


图 2 交-直-变频电源原理图

2) 逆变器调频、斩波器调压和不控整流器整流方式。如图 2b 所示，由于整流使用二极管，导致了高出输入功率因数。由于采用晶闸管作为输出逆变环节功率器件，输出含有较多谐波成分。

- 3) 同时实现调压调频、不控整流器整流方

式的 PWM 逆变器。如图 2c 所示，此时采用高开关频率的逆变器，加上装置输入功率因数高，因而输出谐波很少，性能很好。所提出的变频电源利用不可控的二极管整流，以达到提高网侧电压功率因数的目的，整流得到的直流电压稳压采

用大电容进行，进而提供直流电压给逆变器，再通过逆变器输出可变频率和幅值的信号。

3.3 变频器控制电路

本研究采用最基本的控制电路组成部分，其控制电路如图 3 所示。

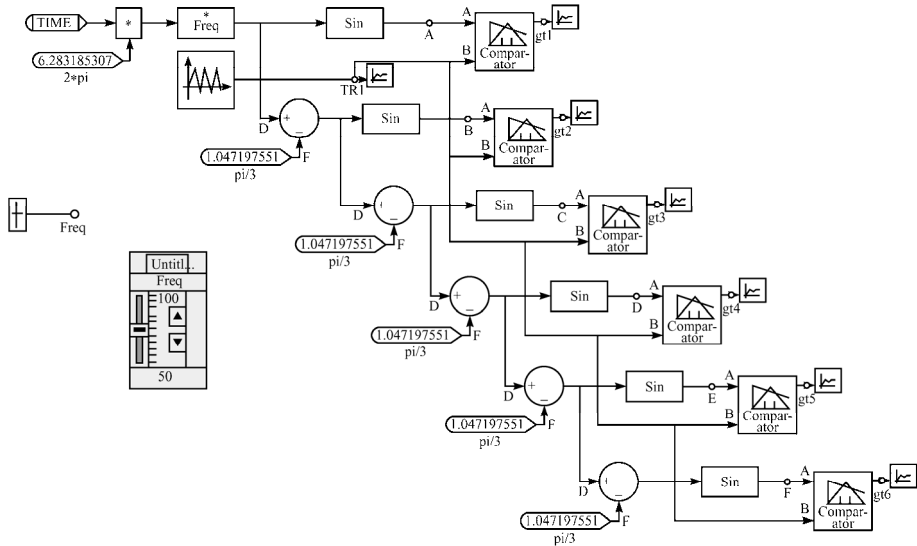


图 3 变频器控制电路模型

在控制电路中，通过改变 Freq 的值，可以改变输出信号频率，进而使得逆变后的电压频率随之改变，实现 3~100 Hz 的频率范围的变化。逆变后电压的控制有多种方法，可以利用斩波电路、变压器等方法加以实现。斩波电路则可以加在中间环节的直流电路部分，通过对斩波电路的控制，可以升高或降低整流后的直流电压，进而控制逆变后的电压幅值，实现对变频器的输出电压的控制。变压器控制可以将变压器加在整流部分前的交流电路部分，也可以加在逆变部分后的

交流电路部分，通过对变压器电压比的调节，来实现控制变频器输出电压。

4 变频器运行仿真

利用 Matlab/Simulink^[7]平台搭建了一个三相 PWM 交-直-交变频器仿真模型^[8]。图 4 为搭建的交-直-交变频器模型原理图，主要由用于控制的 PWM 发生器、直流侧电容 C、整流器和电压源逆变器组成。工程中还可能输入和输出侧滤波器。

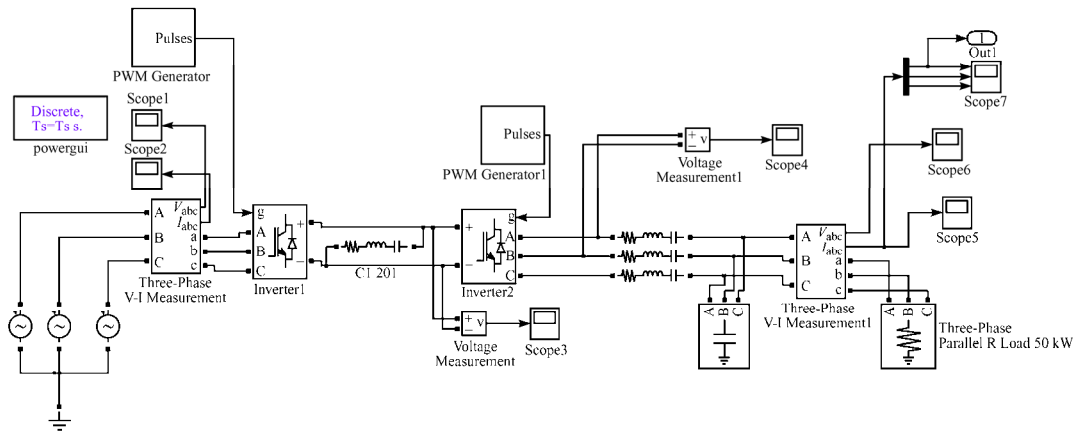


图 4 三相 PWM 交-直-交变频器仿真模型

仿真模型输入为三相工频 50 Hz 的交流电源,经采用 Universal Bridge1 SPWM 整流器的整流,电容器滤波对输出直流电压进行滤波,再进入 Universal Bridge2 的 SPWM 逆变器^[9],逆变 PWM 模块信号产生采取内调制波方式,载波波形为三角波。当直流逆变成交流后,再经由电感 L 和电容 C 构成的滤波器进行滤波后,连接到三相负载上。

本仿真模型假设电源为 3 相 50 Hz,相电压幅值为 500 V;左边是载波频率为 1 000 Hz 的 PWM 发生器; m 为调制系数,其值为 0.8; C 为直流侧滤波电容,值为 20 F;逆变器输出侧的电感 L 为 6 mH;滤波电容器无功功率 $Q_C=3$ kvar;三相负荷有功功率为 50 kW。

图 5 为有变频器的输入侧电流。从图 6 中可以看出,变频器与逆变器的电压、电流都存在大量纹波。

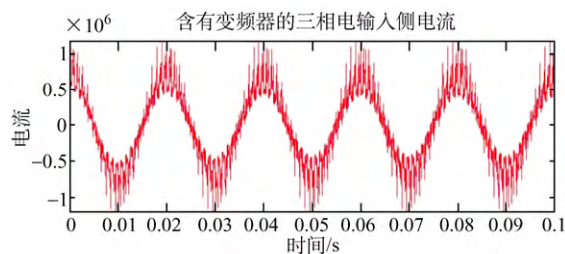


图 5 有变频器的输入侧电流

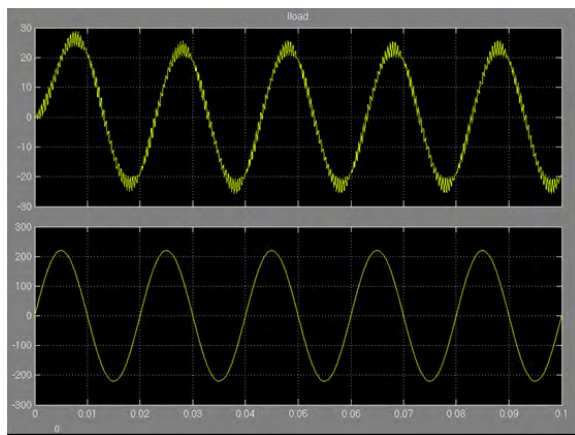


图 6 接入逆变器后的电压、电流仿真波形

5 结束语

节能设备的推广应用给用户和社会环境都带来了巨大利益,但也会产生一些负面效果,会

对电网带来干扰,对用电设备的电能计量和 EMC 带来影响,同时也会对电力线载波通信产生影响。仿真变频器的节能设备运行产生的电压、电流纹波,为在节能环境下研究计量、通信的可靠性创造了有利条件。

参考文献

- [1] 干永革,王文,李发海,等.交-交变频同步电机控制系统供电电网谐波分析[J].中国电机工程学报,1999,19(6):21-25.
- [2] 林桦,邹云屏,王兴伟.交交变频器-同步电动机系统等效电路模型及电流调节器设计[J].中国电机工程学报,2005,25(8):135-137.
- [3] Lam J, Jain P K. A boost-type high power factor single switch electronic ballast for compact fluorescent lamps (Energy-Saving Lamps) [C]. IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2011:2855-2856.
- [4] 董剑宁,黄允凯,金龙,等.高速永磁电机设计与分析技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(27):4640-4642.
- [5] 李邦峰,张勇军,李勇,等.受端系统动态无功补偿优化建模方法综述[J].电网技术,2007,31(15):22-24.
- [6] 董亮.4 kW 开关磁阻电机控制与驱动系统设计[D].北京:北京交通大学,2008.
- [7] 王正林,王胜开,陈国顺,等. Matlab/Simulink 与控制系统仿真[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [8] 姚兴佳,张继明,李宏峰,等.基于 Matlab/Simulink 的双 PWM 逆变系统的仿真[J].电气技术,2007,(12):20-23.
- [9] 吴天明,赵力新,刘建存. Matlab 电力系统设计与分析[M].3 版.北京:国防工业出版社,2004.

作者简介

李贺龙(1986-),男,工程师,主要研究方向为电能计量与电能质量。

(收稿日期:2015-12-10) EA

(编辑:崔岩)