

基于谐波载波海浪发电技术的设计

潘昭栋, 柴琳, 刘惠康

(武汉科技大学 信息与工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘要: 海浪发电系统中的电网为海岛孤网, 电网负载多为非线性负载且负载经常变化, 会产生多次谐波污染电网并引起电网不平衡。传统有源电力滤波器进行谐波处理只能对电网负载谐波源引起的谐波进行处理, 忽略了模型器件本身和计算误差引起的谐波, 谐波治理效果差。在传统的有源滤波的基础上, 基于瞬时无功功率理论和模糊控制理论, 采用了模糊控制策略和谐波载波的方式, 加入了谐波误差控制环节, 能更好地消除谐波, 并用Matlab进行仿真, 仿真结果验证了方案的正确性和可行性。

关键词: 海浪发电; 非线性负载; 谐波载波; 模糊控制; 谐波治理

中图分类号: TM464

文献标识码: A

Design Based on Harmonic Carrier Wave Power Technology

PAN Zhaodong, CHAI Lin, LIU Huikang

(Information and Engineering Institute, Wuhan University of Science and Technology,

Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: Power grid is island isolated net in wave power system, and power grid load is nonlinear loads and changed frequently, which can produce multiple grid harmonic pollution and lead to an imbalance of power grid. The harmonic treatment effect of traditional active power filter is bad, because the traditional active power filter could govern harmonic caused by power grid load harmonic source but ignore harmonics that caused by device itself and model calculation error. On the basis of the traditional active filter, and based on the instantaneous reactive power theory and fuzzy control theory, then fuzzy control strategy and harmonic carrier way were used, and joined the harmonic error control link, which could better eliminate harmonics. Using Matlab simulation, the simulation results verify the correctness and feasibility of the scheme.

Key words: wave power generation; nonlinear load; harmonic carrier; fuzzy control; harmonic governance

海浪发电多在偏远的孤岛, 电网所连接的电网大多为海岛孤网, 且电网所接负载多为节能灯、变频空调等家用电器, 这些负载都是非线性负载。在海浪发电系统中, 不仅有谐波源电网负载端引起谐波, 还有系统模型和电子器件本身以及计算误差都会产生谐波也会影响电网电流波形, 其中, 系统模型器件本身和计算误差引起的谐波不能计算出来, 也不能定量的进行分析, 难以消除。

针对海浪发电系统里面的谐波问题, 本文提出在发电的过程中进行谐波处理, 能够提高整个方案的经济性和有效性。本文的创新点: 1) 采用了谐波载波的方式; 2) 在传统有源滤波的基础

上, 采用模糊控制策略, 加入了谐波补偿环节。

1 海浪发电系统结构和原理

海浪发电系统由主电路和控制电路两部分组成。主电路包括海浪发电环节(波浪共振器, 液压传动, 电机), 整流器, 逆变器, 电网。控制电路部分由谐波指令电流模块、谐波电流偏差控制模块、发电基波电流模块组成。海浪发电原理: 波浪共振器能发出各种频率的波, 这些不同频率的波作用于不同的物体就会产生相应的共振波, 当这种波到达相应的程度就能够带动液压杠杆上下摆动, 从而带动电机工作, 发出三相交流电,

作者简介: 潘昭栋(1989-), 男, 硕士研究生, Email: 562915529@qq.com

经过整流器整流和逆变器逆变,流向电网,给负载供电^[1]。本文基于瞬时无功功率理论和模糊控制理论,提出集发电和谐波处理于一体的海浪发电系统。谐波处理在传统的有源滤波的基础上,采用谐波载波的方式,加入了模糊控制器并引入了谐波偏差控制环节,能够有效地改善电网电流波形。采用谐波载波的方式即将谐波指令电流、谐波偏差电流加载在发电基波电流上的方式,通过PWM进行脉宽调制,控制逆变输出,这样既能发电又能消除谐波。其中发电基波电流是大电流,谐波指令电流是小电流(幅值是基波电流的20%以下)即消除谐波电流的主力,谐波电流偏差是小电流(幅值是谐波指令电流的10%以下)即实际谐波电流和逆变输出谐波电流的偏差量,采用这种谐波载波的方式,具有快速性好、节约投资、精度好控制的优点。系统框图如图1(文章都以a相为例)所示。

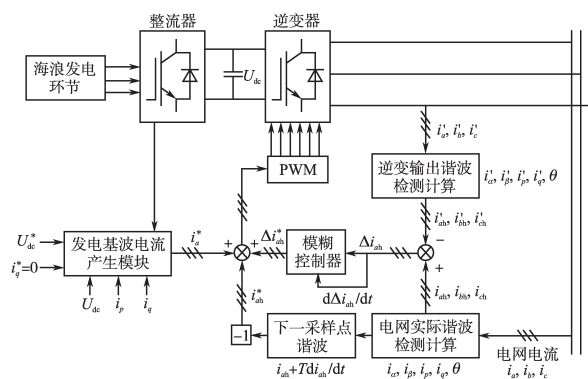


图1 系统结构框图

Fig.1 System structure diagram

在图1中, i_a^* 是发电基波模块产生的发电基波电流, i_{ah}^* 是谐波指令电流模块产生的谐波指令电流, Δi_{ah}^* 是谐波补偿模块产生的谐波补偿电流。 i_a 是从电网采样的三相电流, i_a' 是从逆变输出采样的三相电流, $T(ms)$ 是采样周期, $\theta = \omega t$ 是功率因数变换角。 i_a, i_b, i_p, i_q 是电网三相电流基于瞬时无功理论计算三相谐波电流 i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} 的中间量, i_a', i_b' 等也类似。 U_{dc} 是直流母线电压, U_{dc}^* 是电压给定, $i_q^* = 0$ 是无功电流给定。

1.1 发电基波电流模块

发电基波电流产生模块采用的是最大功率跟踪技术,通过海浪能捕获模型以最大功率捕获海浪能,经过功率逆变得得到发电基波电流如图2所示。其中海浪能捕获模型是研究的另一个子方向,本文就不详细叙述了。

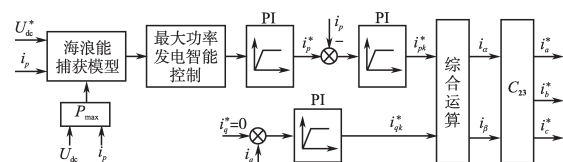


图2 发电基波电流产生原理图

Fig.2 Fundamental wave current generation module schematic diagram

1.2 基于瞬时无功理论的谐波电流检测

采用基于瞬时无功理论的谐波检测方法^[2],谐波电流产生原理图如图3所示。

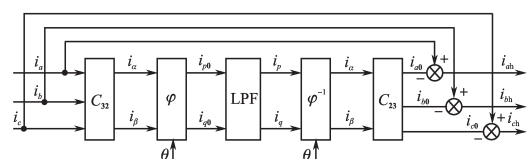


图3 谐波信号检测原理图

Fig.3 Harmonic current signal detection schematic diagram

海浪发电系统一般是三相4线制系统,经过采样开关,采集电网的三相电流 i_a, i_b, i_c ,其中含有正序、负序、零序分量依次用0,1,2表示。

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

式中: C_{32} 为3/2坐标变换矩阵; i_α, i_β 为两相静止电流。

对三相电流的零序分量进行分析:

$$\begin{cases} i_a = i_{a0} + i_{a1} + i_{a2} \\ i_b = i_{b0} + i_{b1} + i_{b2} \\ i_c = i_{c0} + i_{c1} + i_{c2} \end{cases} \quad (2)$$

而三相电流中的零序分量都相等,即

$$i_{a2} = i_{b2} = i_{c2} = (i_a + i_b + i_c)/3 \quad (3)$$

我们将其转换成两相静止的电流,则有:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \\ &= 0 + \begin{bmatrix} i_{\alpha 1} + i_{\alpha 0} \\ i_{\beta 1} + i_{\beta 0} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)计算可以得到结论:两相静止电流 i_α 和 i_β 中不再含有难以测得的零序电流分量,而只含有产生基波电流信号和谐波电流信号,同样,在经过功率因数变换的有功电流分量和无功电流分量也不会再含有零序分量,因此,直流电流中不会含有零序分量。

$$\begin{bmatrix} i_{p0} \\ i_{q0} \end{bmatrix} = \varphi \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\varphi = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \\ -\cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix}$$

式中: i_{p0} , i_{q0} 为含有高次谐波的有功电流和无功电流,且都不再含有零序电流分量; φ 为功率因数变换矩阵。

i_{p0} 和 i_{q0} 再经过低通滤波器 LPF , 滤掉高次谐波信号, 得到不含高次谐波的有功电流 i_p 和无功电流 i_q , 经过功率因数反变换 (φ^{-1}), 得到不含谐波信号的电流 i'_a 和 i'_β , 经过 2/3 变换得到不含高次谐波的三相电流 i_{a0} , i_{b0} , i_{c0} , 由电网三相电流 i_a , i_b , i_c 和不含谐波信号的三相电流 i_{a0} , i_{b0} , i_{c0} 比较输出, 得到从电网测得的实际参考谐波电流 i_{ah} , i_{bh} , i_{ch} 。

同理, 逆变输出的谐波电流的获取也采用相同的理论, 最终可以得到逆变输出的谐波电流 i'_{ah} , i'_{bh} , i'_{ch} 。

通过谐波检测模块, 可以得到谐波指令电流和谐波偏差电流, 由于上述 2 个电流都是小电流通过 PWM 控制精度不好控制, 容易出现误差, 故将这 2 个小电流信号采用谐波载波的方式加载在大的发电基波电流信号上, 不仅节约投资并且快速性好、精度好控制。

1.3 谐波电流误差分析

在海浪发电系统中, 采用有源电力滤波的方式进行谐波治理, 其实是从电网电流中采样, 计算得到谐波指令电流, 理想情况是谐波指令电流能够时刻跟随实际谐波电流, 谐波指令电流经过反向后, 通过 PWM 进行脉宽调制^[3], 控制逆变器输出一个大小与实际电流相等、方向相反的谐波电流, 注入电网与电网中的谐波电流湮灭。通过采样开关进行采样得到的实际参考谐波电流 i_{ah} , i_{bh} , i_{ch} 都是离散信号, 假设采样的是 k 时刻的电流 $i_{ah}(k)$, 则有:

$$i_{ah}(k+1) = i_{ah}(k) + T di_{ah}(k)/dt \quad (6)$$

式中: $i_{ah}(k+1)$ 为下个周期的谐波电流; T 为采样周期, ms。

在传统的有源滤波的过程中, 将 $k+1$ 时刻的谐波电流反向后得到谐波指令电流 i_h^* , 通过 PWM 控制逆变器输出一个反方向的谐波电流, 与电网中的谐波电流湮灭, 达到消除谐波的目的。对谐波电流信号局部放大进行分析, 如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 传统的有源滤波未加误

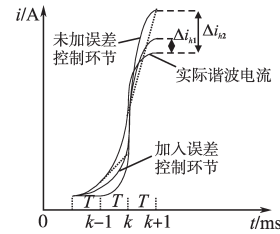


图4 谐波电流局部放大图

Fig. 4 Local large harmonic current figure

差控制环节, 产生的谐波指令电流对实际谐波电流的跟随效果并不好, 偏差较大, 这是因为系统模型、计算误差等非线性因素的影响导致的, 为了达到较好的跟随效果, 必须加入谐波电流误差控制环节, 又由于一些非线性因素的影响, 所以本文在谐波电流补偿环节采用的是模糊控制策略。

1.4 模糊控制器设计

在谐波电流的补偿环节中, 需要采用模糊控制策略, 为此设计了一个拥有 2 个输入 1 个输出模糊控制器。此模糊控制器以实际参考谐波电流 i_{ah} , i_{bh} , i_{ch} 和逆变输出谐波电流 i'_{ah} , i'_{bh} , i'_{ch} 比较输出得到的偏差 $e = \Delta i_h$ (一般是 $0.5 \sim 1$ A) 和谐波电流偏差的变化率 $ec = d\Delta i_h/dt$ (一般取 $0.1 \sim 0.6$ A/ms) 作为输入变量, 定义 $e = i_{ah} - i'_{ah}$ 。将输入变量模糊化后乘以适当的比例因子转换成论域中的数值 E 和 EC , 再经过模糊推理得到模糊控制器的输出变量 U , 输出变量 U 再经过解模糊得到模糊控制器的实际输出 Δi_h^* , 即谐波补偿电流。

首先, 将谐波量的偏差 E , 偏差变化率 EC 和输出变量 U 转换成模糊集合的隶属度函数, 为了保证控制精度, 选用精度较高的三角函数。设 E 论域为 $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$, 模糊子集为 $\{\text{负大}(NB), \text{负中}(NM), \text{负小}(NS), \text{零}(ZO), \text{正小}(PS), \text{正中}(PM), \text{正大}(PB)\}$, 分别表示实际谐波电流 i_{ah} 相对于反馈谐波电流 i'_{ah} 为: “极小”、“很小”、“偏小”、“相等”、“偏大”、“很大”、“极大”。 EC 的论域为 $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$, 模糊子集为 $\{\text{负大}(NB), \text{负小}(NS), \text{零}(ZO), \text{正小}(PS), \text{正大}(PB)\}$, 表示实际谐波变化的趋势: “反向较大”、“反向较小”、“为零”、“正向较小”、“正向较大”。输出量 U 的论域为 $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$, 模糊子集为 $\{\text{负大}(NB), \text{负中}(NM), \text{负小}(NS), \text{零}(ZO), \text{正小}(PS), \text{正中}(PM), \text{正大}(PB)\}$, 表示“实际谐波电流极小谐波电流偏差最大”、“实际谐波电流很小谐波电流偏差加大”、“实际谐波电流偏小谐波电流偏差减小”、“实际谐波电流适中谐波电流

偏差为零”、“实际谐波电流偏大谐波电流偏差反向减小”、“实际谐波电流很大谐波电流偏差反向加大”、“实际谐波电流极大谐波电流偏差反向最大”。 E, EC, U 的隶属度函数如图5所示,其中图5a为 E 的隶属度函数;图5b为 EC 的隶属度函数;图5c为 U 的隶属度函数。

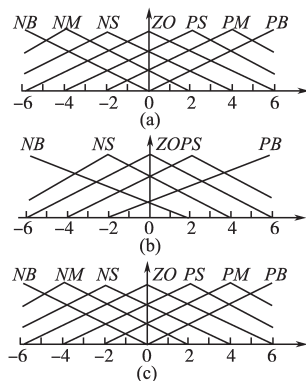


图5 模糊子集的隶属度函数

Fig.5 The membership function of fuzzy subset

其次是模糊规则的建立,根据专家知识和熟练操作人员经验积累,可知:

- 1) if $E=PB$ and $EC=PB$ then $U=NB$,
- 2) if $E=NB$ and $EC=NB$ then $U=PB$,
- 3) if $E=PB$ and $EC=NB$ then $U=PS$,
- 4) if $E=NB$ and $EC=PB$ then $U=PS$,
- ⋮

最后,根据模糊关系进行模糊推理得到控制器的输出变量 U ,采用加权平均法解模糊,将模糊值转换成明确的补偿谐波电流信号。

2 系统仿真

在Matlab软件上搭建系统仿真图,对系统进行仿真。仿真条件为:1)谐波电流检测: i_p, i_q 检测法;2)非线性负载:三相全桥不控整流,直流侧接 $7\ \Omega$;3)电源相电压: $30/\sqrt{2}$;4)电源频率:50 Hz;5)直流母线电压 $U_{dc}=100\text{ V}$;6)逆变器电感:1 mH;7)采样周期 $T=20\text{ ms}$ 。

经过相同的采样周期,负载电流、未加谐波电流偏差控制环节的电网电流、加了谐波电流偏差控制环节的电网电流的仿真结果如图6所示。

图6中,图6a为负载的波形图及FFT分析,图6b为未加谐波电流偏差控制环节的电网电流波形及FFT分析,图6c为加了谐波电流偏差控制环节电网电流波形及FFT分析。仿真结果表明:未加谐波电流偏差控制环节的电网电流畸变率 $THD=$

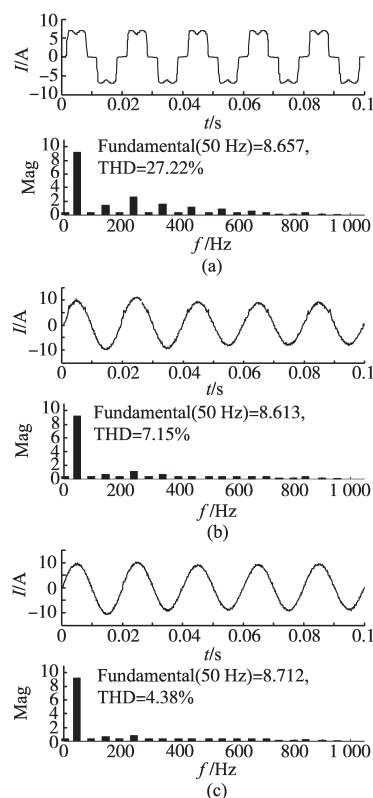


图6 仿真结果图

Fig.6 Simulation results

7.15%,且电网电流波形不光滑有毛刺;加了谐波电流偏差控制环节的电网电流 $THD=4.38\%$ 达到国家要求标准,电网电流波形光滑。

3 结论

在传统有源滤波的基础上,加上一个谐波电流偏差控制环节使用模糊控制策略,并采用谐波载波的方式进行发电和谐波消除,因为考虑了模型器件本身和计算误差等不可测因素引起的谐波电流,所以能够更好地消除电网里面的谐波电流,优化电网电流波形。仿真结果验证了方案的正确性和可行性。

参考文献

- [1] 蔡元奇. 共振波力发电装置: 中国, CN201110233308.7[P]. 2011-08-16.
- [2] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 阮毅, 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 第4版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [4] 张华强, 罗世军, 刘陵顺. 双三相永磁同步电机多矢量控制技术[J]. 电气传动, 2014, 44(9): 3-8.

收稿日期: 2015-05-22

修改稿日期: 2015-11-15