

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.05.020

# 内模控制方法在永磁直驱潮流发电系统中的应用研究\*

戈本星,王沁,杨欢\*,赵荣祥  
(浙江大学电气工程学院,浙江杭州310027)

**摘要:**针对永磁直驱潮流发电控制系统设计的问题,对潮流流速模型、最大功率追踪策略、永磁电机矢量控制、并网逆变器控制等方面进行了研究,提出了一种基于内模控制的转速控制算法以及一种新型的并网逆变器模型。使用内模控制器代替了机侧转速外环PI控制器,同时使用并网逆变器小信号模型设计了较准确的并网逆变器的控制参数。最后,基于上述算法和模型,在Matlab软件平台中对潮流发电系统进行了仿真,并对比了传统PI控制和内模控制下潮流发电系统的输出波形。仿真结果显示,所提出的优化控制策略能够准确控制发电机输出的有功功率、并网有功功率并且能够实现无功功率独立调节以及高功率因数并网运行。

**关键词:**永磁同步发电机;内模控制;潮流发电

中图分类号:TM315

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)05-0527-06

## Application of internal model control method in permanent magnet direct-drive tide power generation system

GE Ben-xing, WANG Qin, YANG Huan, ZHAO Rong-xiang  
(College of Electrical Engineering Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Aiming at design of permanent magnet direct-drive tide power generation control system, tide current speed model, MPPT, vector control of PMSM and control of grid-connected inverter were researched. A kind of speed-regulating strategy based on internal model control method and a sort of novel small signal model of grid-connected inverter were proposed. On the machine side, the internal model controller was adopted instead of the speed PI controller and on the grid side, comparative accurate control parameter was designed based on the small signal model of grid-connected inverter. Finally, the direct-drive permanent magnet tidal current generation system was simulated in Matlab, and this paper also compared the traditional PI control method with the internal model control method under the MPPT. The simulation results indicate that the proposed optimal control strategy can realize accurate control of active power of generators, independent adjustment of reactive power and variable speed constant frequency operation.

**Key words:** PMSG; internal model control; tidal current generation

### 0 引言

目前,世界各国都将目光聚焦到了可再生能源的开发上,包括太阳能、风能、海洋能等<sup>[1-2]</sup>。考虑到其丰富的储量、较强的规律性与可预测性以及海洋生物影响小等优势,海洋能尤其是潮流能逐渐获得了关

注<sup>[3-4]</sup>。目前,主流的潮流能发电机组有两种,分别是双馈型潮流发电机组和直驱式永磁潮流发电机组。与前者相比,后者不需要变速器、电刷和滑环,提高了其稳定性和可靠性。

近几年,许多学者对永磁直驱发电系统的功率主电路和控制策略进行了深入的研究<sup>[5-10]</sup>。主要分为二

收稿日期:2016-10-25

基金项目:浙江省海洋可再生能源电气装备与系统重点实验室基金资助项目(作者未提供)

作者简介:戈本星(1989-),男,云南曲靖人,硕士研究生,主要从事新能源并网发电发电方面的研究。E-mail:benxing@zju.edu.cn

通信联系人:杨欢,男,博士,博士生导师。E-mail:yanghuan@zju.edu.cn

极管整流 + boost 两级变换电路和单级 PWM 整流电路。前者结构简单、可靠性高、成本较低,但需要附加滤波设备,并且无法控制其有功功率,从而降低发电效率;后者,虽然控制策略相对复杂,但是其相对简单。更重要的是,采用单级 PWM 整流在机侧可以有效的控制输出转矩,转矩脉动小,并且能够实现电机的变频调速和最大功率追踪。在维持直流母线电压的基础上,对网侧换流器的控制可以实现高功率因数并网,且并网电流接近正弦波。因此,本研究采用后者。

本研究将设计一种基于内模控制的转速控制算法及一种新型的变网逆变器模型。

## 1 潮流流速与潮流水轮机模型

依据参考文献可知,潮流的流速呈周期性变化,可以用下式来表示<sup>[11]</sup>:

$$v = V_m \left( 1 + K \sin \frac{2\pi t}{T'} \right) \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (1)$$

式中: $T'$ —小潮与大潮之间的周期; $T$ —潮流的周期; $V_m$ —平均速度, $V_m = (V_s + V_n)/2$ ;  $V_s, V_n$ —小潮和大潮的最大速度; $K$ —潮流的速度波动系数,其数值一般取0.2。

潮流流速模型如图1所示。

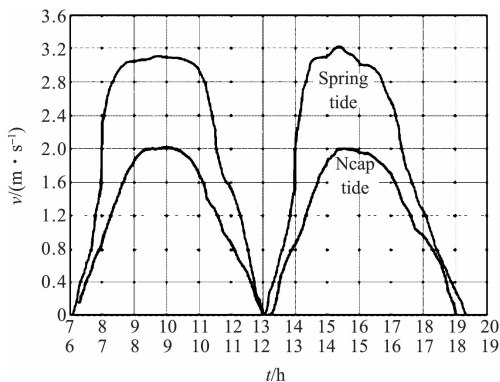


图1 潮流流速模型

由于潮流发电的水轮机与风力发电的风力机工作原理相似,本研究采用与风力发电机相同的发电机模型作为潮流水轮机模型<sup>[5-13]</sup>。另外,本研究只考虑桨距角  $\beta = 0$  的理想情况。此时对应的最大功率利用系数  $c_{pmax} = 0.48$ , 对应的最大叶尖速比  $\lambda = 8.1$ 。

## 2 MPPT 算法

永磁同步电机定子电压方程为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_s \psi_{sd} \end{cases} \quad (2)$$

定子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + \psi_f \\ \psi_{sq} = L_{sq} i_{sq} \end{cases} \quad (3)$$

电磁转矩、运动方程为:

$$\begin{cases} T_e = \frac{3}{2} n_p i_{sq} [\psi_f + i_{sd} (L_{sd} - L_{sq})] \\ T_m - T_e = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_s}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $R_s, L_{sd}, L_{sq}$ —定子电阻、直轴电感和交轴电感; $u_{sd}, u_{sq}, i_{sd}, i_{sq}$ —定子电压和定子电流  $d, q$  轴分量; $\psi_f$ —永磁体磁链; $J$ —转动惯量; $p$ —微分算子; $n_p$ —极对数; $\omega_s$ —电角速度; $T_m$ —机械转矩; $T_e$ —电磁转矩。

由于本研究算例中的永磁发电机不考虑其凸极性,  $L_{sd} = L_{sq} = L_s$ 。电压方程可进一步简化为:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s L_s i_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s L_s i_{sd} + \omega_s \psi_f \end{cases} \quad (5)$$

发电机的变流器与发电机定子相连,通过控制发电机的有功功率,可以实时追踪潮流能的最大功率。

在对发电机的控制中,令  $d$  轴电流  $i_d^* = 0$ , 则电磁转矩  $T_e = 1.5 n_p \psi_f i_q$ 。通过控制电流  $i_q$  可以实现电磁转矩控制。如果能够在不同的潮流流速下,通过控制电机的转速使得水轮机的叶尖速比达到最佳,那么就能使发电机的有功功率达到最大值。

为使发电机能实时追踪最大潮流能,最佳转速指令按照获得最佳叶尖速比的原则来给定。类似于最大风能捕获原理和电机功率方程,可以按下式得到潮流发电机组最佳转速指令:

$$\begin{cases} P_s = P_{opt} - \Delta P \\ P_{opt} = T_e \omega_{opt} \\ \lambda_{opt} = \frac{\omega_{opt} R}{v_{tidal}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta P$ —电机的机械损耗、定子铜耗以及铁耗。

获得  $\omega_s^*$  后,将其与测量的  $\omega_s$  进行比较,经过转速内模控制器调节,输出  $q$  轴电流的指令  $i_q^*$ 。

## 3 转速内模控制器

内模控制器在结构上与史密斯预估控制器很相似。它有一个被称为内模的过程模型,控制器的设计可由过程模型直接求取。

### 3.1 控制系统框图和内模控制器

内模控制系统的典型框图如图2所示。

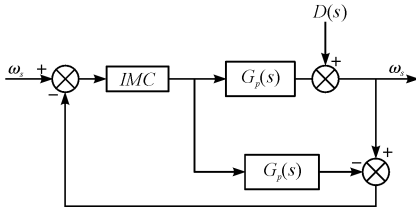


图2 内模控制系统典型框图

$G_p(s)$ — 内模的传递函数; $G_c(s)$ — 内模控制器的传递函数

从图2中可以看出,系统有两个输入:外界扰动(假定为不可测) $D(s)$ 和设定值扰动 $R(s)$ 。系统的传递函数为:

$$Y(s) = \frac{\hat{G}_c(s)G_p(s)}{1 + \hat{G}_c(s)[G_p(s) - \hat{G}_p(s)]} R(s) + \frac{1 - \hat{G}_c(s)\hat{G}_p(s)}{1 + \hat{G}_c(s)[G_p(s) - \hat{G}_p(s)]} D(s) \quad (7)$$

由上述系统传递函数特性可知,当 $G_v(s) = \hat{G}_v(s)$ 且 $\hat{G}_c(s)G_p(s) = 1$ 时无论 $D(s)$ 取何值, $Y(s) = R(s)$ ,即系统输出不受干扰的影响。即使预测模型与实际模型不匹配,也可以通过输出偏差进行调节使系统输出不受干扰。

虽然理想内模控制器具有优异的控制性能,但是在其实际运用中不得不考虑非理想情况。一是采用的模型与各种情况下的实际过程始终存在误差;二是 $\hat{G}_p(s)$ 有时不完全可倒。

鉴于上述情况,内模控制器的设计主要可分为两步。

步骤1 将过程模型作因式分解:

$$\hat{G}_p = \hat{G}_{p+} \hat{G}_{p-} \quad (8)$$

式中: $\hat{G}_{p+}$ — 包含了所有的纯滞后环节和右半平面的零点,并规定其静态增益为1。

步骤2 设计控制器:

$$\hat{G}_c = \frac{1}{\hat{G}_{p-}} f \quad (9)$$

式中: $f$ — 低通滤波器,静态增益为1。

$f$ 的典型形式为:

$$f = \frac{1}{(T_f s + 1)^r} \quad (10)$$

$r$ 可取值为1, $f$ 的选择与闭环系统的性能有着非常密切的联系。时间常数 $T_f$ 越小, $y$ 对 $R$ 的跟踪滞后时间越小。同时时间常数 $T_f$ 越大,系统的鲁棒性越强。所以在设计的时候需要兼顾闭环控制精度和系统鲁棒性来选择合适的 $T_f$ 。

### 3.2 速度环内模控制器设计

速度环控制框图如图3所示。

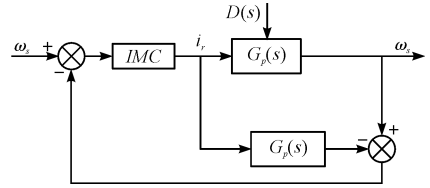


图3 IMC速度环控制框图

从图中可以看出,电机的外部干扰主要集中在电流环外,速度环内。在速度环设置内模控制器,可以很好的减小干扰力矩和转动惯量变化带来的影响,提高系统抗干扰能力。一般来说,电流环经过解耦控制以及设置较高的截止频率后,传统的电流环设计方法已经具有较好的控制性能,其不足之处在于按传统设计方法设计速度环PI参数值时可能与实际参数值相差较大。采用内模控制,可以直接利用 $G_p(s)$ 中最小相位项,将非最小相位系统与此最小相位系统的差送到控制器中进行调节。这里最小相位系统取: $\hat{G}_{p-} = 1 \cdot (J/K_t s + b/K_t)^{-1}$ ,其中: $K_t$ — 永磁同步发电机转矩系数, $b$ — 其摩擦系数。则内模控制器的传递函数为:

$$\hat{G}_c = \frac{J/K_t s + b/K_t}{T_f s + 1} \quad (11)$$

其中,只有 $T_f$ 是唯一需要调节的量,试取不同的 $T_f$ ,然后根据响应结果,作出相应的调整。

## 4 网侧变流器控制

电网侧变流器作为并网型直驱永磁同步潮流发电机与电网相连的重要环节,其主要作用包括:稳定直流侧电容电压,保证机侧变流器有功功率能及时馈入电网;实现单位功率因数控制;确保交流侧输出电流波形为正弦波。

在大多数文献中,通常是基于状态方程来对并网逆变器进行设计的,由于没有考虑调制所带来的影响,得出来的模型往往不够精确,设计的参数与实际参数相差较大。这里,在PWM整流器基本方程组的基础上,对输入增加小扰动量,可以获得比较实用准确的小信号模型。

通过对电网电压定向,前馈解耦并假设 $i_q = 0$ ,PWM整流器的状态方程可表示如下:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = e_d - d_d V_{dc} - Ri_d \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = 1.5 d_d i_d - \frac{V_{dc}}{R_L} \end{cases} \quad (12)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = -u_q - Ri_q \quad (13)$$

式中： $i_d, i_q$ —定子  $d, q$  轴电流； $d_d, d_q$ — $d, q$  轴等效占空比； $V_{dc}$ —直流电压； $R_L$ —直流侧负载； $u_d, u_q$ —交流侧  $d, q$  轴电压。

由式(12 ~ 13)可知  $d, q$  轴电流环实现解耦,但是  $d$  轴电流与直流电压相互耦合。为了得到电压环控制对象的 SISO 系统,可对式(12)施加小扰动,即令:

$$\begin{cases} V_{dc} = \bar{V}_{dc} + \hat{v}_{dc} \\ i_d = \bar{I}_d + \hat{i}_d \\ d_d = \bar{D}_d + \hat{d}_d \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)代入式(12),并忽略扰动的二次项与直流量,可得:

$$\begin{cases} L \frac{d\hat{i}_d}{dt} = -\hat{d}_d V_{dc} - \bar{D}_d \hat{v}_{dc} \\ C \frac{d\hat{v}_{dc}}{dt} = 1.5 \hat{d}_d \bar{I}_d + 1.5 \bar{D}_d \hat{i}_d - \frac{\hat{v}_{dc}}{R_L} \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)整理可得  $d$  轴电流到直流电压的开环传递函数  $G_v(s)$ :

$$G_v(s) = \frac{\hat{v}_{dc}(s)}{\hat{i}_d(s)} = \frac{3E_d R_L}{4V_{dc}} \frac{1 - \frac{2LV_{dc}^2 s}{3E_d^2 R_L}}{1 + \frac{CR_L s}{2}} \quad (16)$$

由上式可知,电压环开环传递函数存在一个位于右半平面的零点,是一个非最小相位系统。电压环控制框图如图 4 所示。

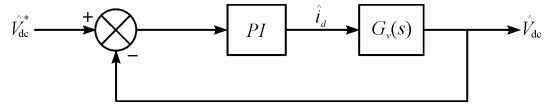


图 4 电压环控制框图

设计控制器时应确保电压环截止频率能够避开右半平面的零点,一般使电压环截止频率低于此零点频率的 1/6,同时尽可能地增加电压环的带宽。另外由于电机额定功率为 200 kW,则等效负载  $R_L = 11.25 \Omega$ 。设计前后的波特图,如图 5 所示。

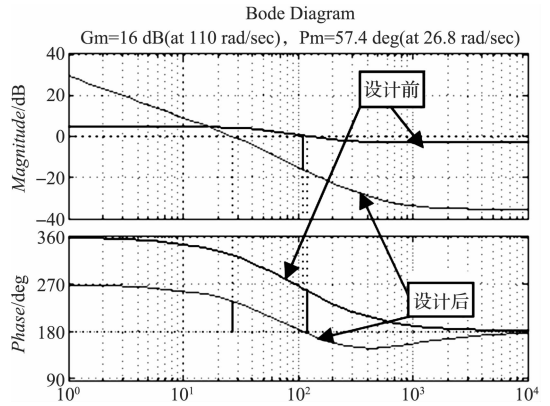


图 5 电压环开环传函波特图

由图 5 可以发现,设计后的稳态精度有所提高,并且在保证合适的稳定裕度下,电压环截止频率避开了开环传函波特图上右半平面零点对应的频率。

综上所述,结合永磁同步发电机与并网逆变器的控制信息组成的控制框图如图 6 所示。

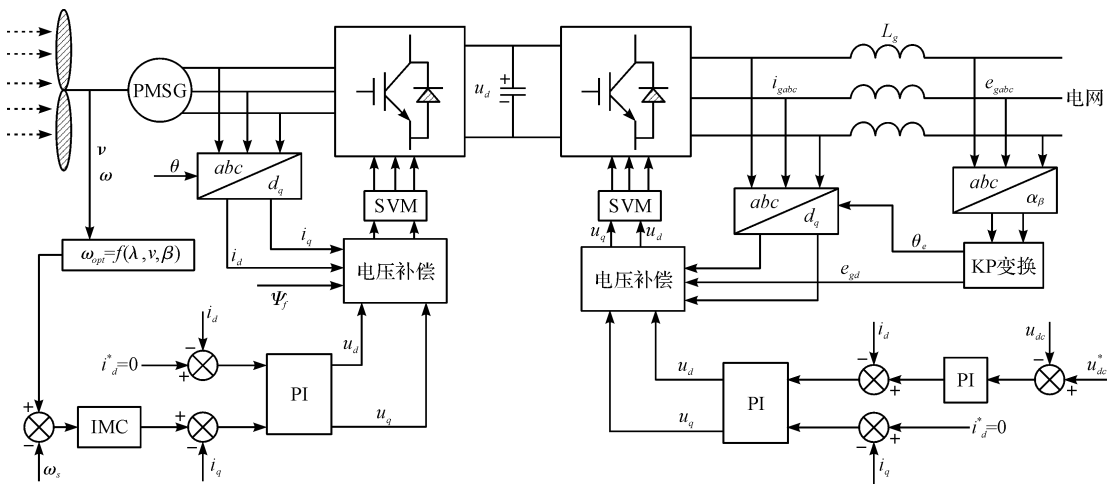


图 6 双 PWM 永磁直驱型潮流发电控制框图

## 5 永磁直驱潮流发电系统仿真分析

### 5.1 仿真模型的建立

笔者利用 Matlab 搭建了一台 200 kW 永磁直驱潮

流发电机的仿真模型。内模控制器参数  $T_f$  取值为 0.5,采用 PI 控制的速度环 PI 取值分别为 8 和 0.1;对网侧变流器采用了矢量控制策略,控制参数按照上述方法设计。仿真参数如表 1 所示。

表1 系统仿真参数

	参数	数值
潮流水轮机	海水密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1 025
	潮流水轮机半径/m	12
	桨距角	0
	最佳叶尖速比	8.1
	最大功率利用系数	0.45
	额定容量/kW	200
	定子额定电压/V	400
发电机	极对数	22
	定子电阻/ $\Omega$	0.245
	定子电感/mH	24
	转子永磁体磁通/Wb	19
	转动惯量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	1 000
直流侧	电容/mF	10
	设定电压/V	1 500
网侧变流器	进线电抗器电阻/ $\Omega$	0.1
	电感/mH	2
	电网电压/V	380

由潮流的模型可知,潮流波可等效为幅值时变的正弦波。为了简化仿真,可以使用幅值恒定的正弦波代替式(1)表示的潮流波进行潮流并网发电的模拟。本研究的仿真采用的潮流波波形如图7所示。

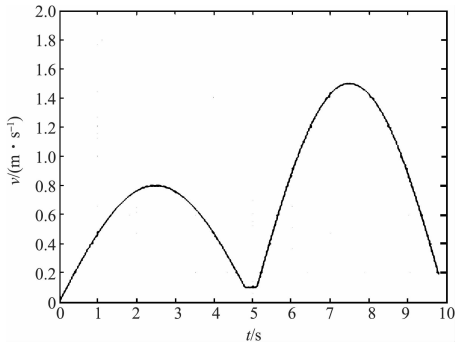


图7 潮流流速给定波形

如图7所示,0~5 s时模拟潮流为频率0.2 Hz,幅值0.8 m/s的正弦波,此时模拟小潮。5 s~10 s时模拟潮流为频率0.2 Hz,幅值1.5 m/s的正弦波,此时模拟大潮。当流速过低,低于1 m/s,发电机不发电。当流速超过2 m/s,发电机工作在恒功率模式。

### 5.2 2种控制策略下水轮机功率系数与叶尖速比的对比

在两种控制模式下,叶尖速比稳态值均为8.1,与理论相符。从图8中可以明显看出采用IMC控制的动态性能比使用PI控制更为理想。功率利用系数和叶尖速比在IMC控制下能够更快地达到稳定值。当 $t=5$  s左右,潮流由小潮波形切换为大潮波形,IMC控制下的叶尖速比与功率系数的调节时间更短,过调量也更小。两种控制下的叶尖速比如图8所示。

### 5.3 2种控制策略下发电机角速度、电磁功率的比较

发电机转子的电角速度随潮流速度变化的波形如图9所示。

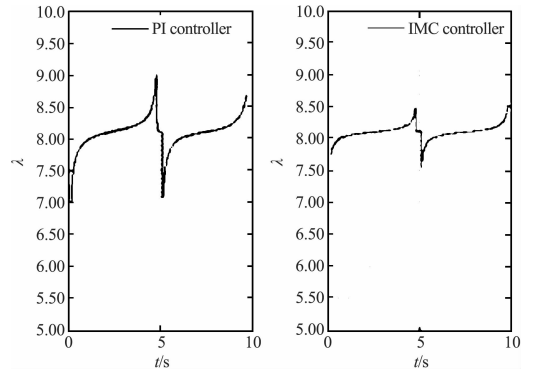


图8 两种控制下的叶尖速比

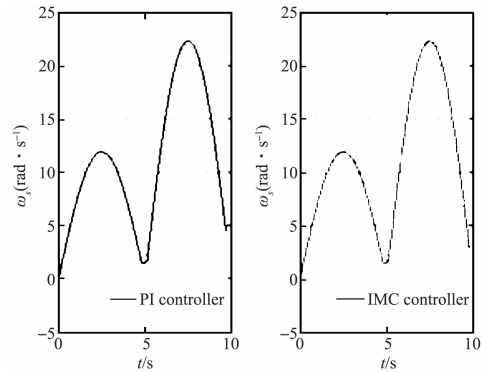


图9 PMSM发电机电角速度

由图9可知在IMC控制与PI控制下,转速波形几乎重合。图9转速的变化表示在不同的潮流速度下,转速按最佳叶尖速比进行调整,间接控制驱动转矩,进而可以控制有功功率。

### 5.4 2种控制策略下并网逆变器直流母线电压、并网电压电流、并网功率对比

直流母线电压波形,并网有功功率波形,并网逆变器交流侧A相电压电流波形如图(10~12)所示。

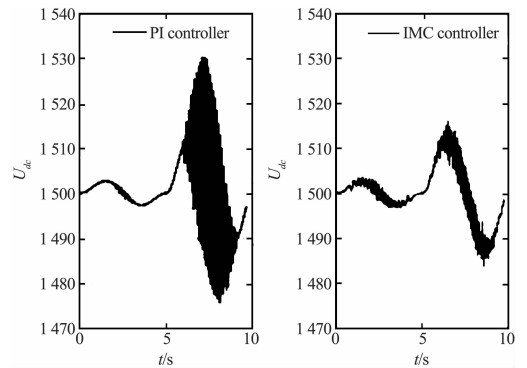


图10 并网逆变器直流母线电压

当潮流流速加快时,系统给直流侧电容充电,直流电压随之升高;当流速减缓时,直流电压随之降低。电压值在给定值1 500 V附近上下波动。当潮流为小潮时,PI控制下,直流母线电压纹波相对较小,电压波形更加平滑;但当处于大潮时,直流母线电压波动较大,严重时,其波动幅值甚至可以达到 $\pm 30$  V,近似为IMC控

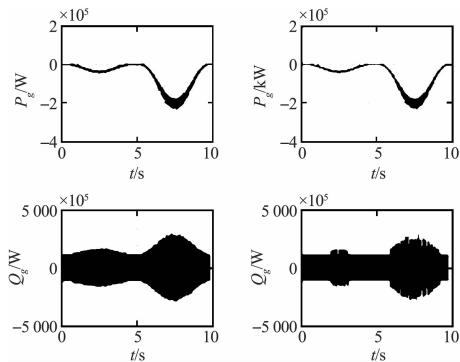


图 11 并网逆变器有功与无功

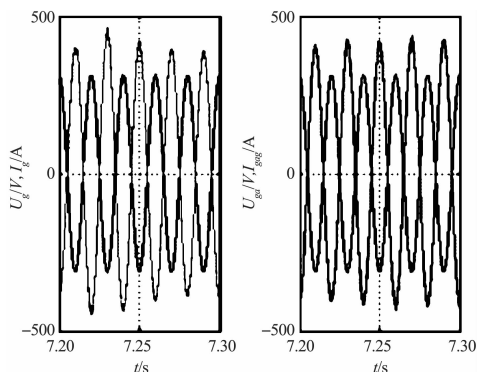


图 12 并网逆变器 A 相电压与电流

制下的两倍;当潮流速度继续增加,PI 控制将会完全失去稳定。由此可说明 IMC 控制范围更大,抗干扰能力更强。由于发电机功率通过电机、机侧变流器,网侧变流器,滤波电容与电感(均含有电阻)之后会产生一定的损耗,这样并网的有功功率最大值为 200 kW 左右,这与理论非常接近。在图 12 中,当时间为 7.2 s ~ 7.3 s 之间时,逆变器工作在单位功率因数下的逆变状态,可以看出在 IMC 控制下的电流波形更加平滑,THD 更小。

## 6 结束语

本研究将 IMC 控制理论应用到了直驱式永磁同步潮流发电控制系统的研究中,得到了以下结论:

- (1) 当潮流速度变化时,叶尖速比、功率利用系数在 IMC 控制下响应速度更快,超调量更小。
- (2) 电网侧变流器采用电网电压定向的双闭环控制,可以稳定直流母线电压,实现有功功率和无功功率的独立调节,且并网电流接近正弦波。在 IMC 控制下,直流母线电压波动和并网电流 THD 更小。
- (3) 直驱式永磁同步发电机潮流发电系统机侧变流器控制采用 IMC 控制器,一个转速控制环只需要整定一个滤波参数  $T_f$ 。

## 参考文献 (References):

- [1] BP 集团. BP 世界能源统计 [M/OL]. 伦敦: BP 集团, 2013. [http://www.bp.com/zh\\_cn/china/reports-and-publications/bp2030\\_0.html](http://www.bp.com/zh_cn/china/reports-and-publications/bp2030_0.html)
- [2] BP. BP energy outlook [EB/OL]. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook-2035.html>
- [3] 游亚戈,李伟,刘伟民,等. 海洋能发电技术的发展现状与前景[J]. 电力系统自动化,2010,34(14):1-12.
- [4] 石洪源,郭佩芳. 我国潮汐能开发利用前景展望[J]. 海岸工程,2012,31(1):72-80.
- [5] JAHROMI M J, MASWOOD A I, TSENG K J. Design and evaluation of a new converter control strategy for near-shore tidal turbines[J]. *Industrial Electronics IEEE Transactions on*,2013,60(12):5648-5659.
- [6] WANG L, LI C N. Dynamic stability analysis of a tidal power generation system connected to an onshore distribution system[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011,26(26):1191-1197.
- [7] LEON A E, MAURICIO J M, GOMEZ-EXPOSITO A, et al. An improved control strategy for hybrid wind farms[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*,2010,1(3):131-141.
- [8] SOUSOUNIS M C, SHEK J K H, CROZIER R C, et al. Comparison of permanent magnet synchronous and induction generator for a tidal current conversion system with onshore converters[C]. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, New York: IEEE,2015.
- [9] SOUSOUNIS M C, SHEK J K H, MUELLER M A. Modeling, control and frequency domain analysis of a tidal current conversion system with onshore converters[J]. *Iet Renewable Power Generation*,2015,10(2):158-165.
- [10] RAHMAN M L, OKA S, SHIRAI Y. Hybrid power generation system using offshore-wind turbine and tidal turbine for power fluctuation compensation (HOT-PC)[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*,2010,1(2):92-98.
- [11] YOU J, MENG F R, LUO Y H. Variable speed constant frequency tidal current energy generation and control strategy for maximum power point tracking and grid connection [C]. *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, Supergen; IEEE,2009.
- [12] LAHFAOUI B, ZOUGGAR S, ELHAFYANI M L, et al. Modeling validation and MPPT technique of small wind PMSG turbines using DSPACE hardware[C]. *International Renewable and Sustainable Energy Conference*, New York: IEEE,2015.
- [13] 段晓丽. 以潮流能为主的多能互补直流微电网控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学机电工程学院,2013.
- [14] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统—运动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[编辑:周昱晨]

### 本文引用格式:

戈本星,王沁,杨欢,等. 内模控制方法在永磁直驱潮流发电系统中的应用研究[J]. 机电工程,2017,34(5):527-532.

GE Ben-xing, WANG Qin, YANG Huan, et al. Application of internal model control method in permanent magnet direct-drive tide power generation system [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017,34(5):527-532.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>