

永磁磁阻发电机的电压控制

吴义勇, 孙旭东, 柴建云

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 普通永磁同步发电机由于励磁不可调, 端电压随转速或负载变化而变化, 影响了供电品质。本文提出一种永磁磁阻发电机的电压控制策略, 通过与发电机并联的电力电子装置, 对其补偿适当励磁所需的无功电流, 来保持发电机端电压的稳定。本文阐述了该发电机系统的结构、原理、电机的数学模型和电压控制方法。仿真实验证明该方法可在一定的转速和负载变化范围内保持端电压不变, 补偿电流较小。

关键词: 永磁磁阻发电机; 电压控制; 逆变器

中图分类号: TM91

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2006)04-0063-04

1 引言

稀土永磁交流发电机具有体积小、重量轻、效率高和可靠性高等突出优点。永磁发电机应用领域非常广阔, 航空航天用的主发电机、小型风力发电机、小型内燃机发电机、小型水力发电机、汽车发电机等都不同程度地使用了永磁发电机^[1-4]。然而, 永磁同步发电机的励磁恒定无法调节, 因而当转速或负载变化时其端电压随之变化, 尤其带感性负载时, 发电机电压变化率更大, 因此要保持恒压比较困难。

为了维持永磁发电机转速或负载变化时输出电压稳定, 目前采用的方法有全功率变换调节^[5,6], 或者采用组合励磁调节等^[7]。其中, 全功率变换需要较大的变流器容量, 且调节范围有限; 组合励磁需要增加电励磁绕组, 使发电机体积增大, 需要外加励磁电源。

本文提出了一种用于永磁磁阻^[8]同步发电机的逆变器及其控制方法, 它利用这种发电机的特点, 采用并联补偿方式来调节发电机端电压, 从而在转速和负载变化时维持负载电压稳定。

2 结构与控制原理

2.1 系统结构

永磁磁阻发电机系统图(以带直流负载为例)如图1所示。系统由原动机、永磁磁阻发电机 G 、电压

型逆变器、电抗器 L 、整流器、测量电路、保护装置等组成。

原动机转速或负载变化时, 保持发电机端电压恒定的磁场调节作用, 是由逆变器发出补偿电流, 通过电抗器输入发电机的方法来实现的。

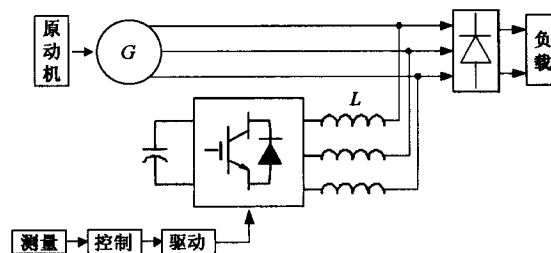


图1 永磁磁阻发电机系统图

Fig.1 System of permanent-magnet/reluctance generator

2.2 永磁磁阻发电机电压控制原理

永磁磁阻发电机是一种正凸极效应很明显的永磁同步发电机, 其特点是 L_d 比 L_q 大很多, 这与通常的永磁发电机是不同的。按照发电机惯例, 忽略电枢电阻, 其相量图如图2所示。

在图2中, 实线为发电机负载运行时的相量图。受直轴电枢反应的影响, 发电机端电压 U 低于空载电动势 E_0 。为了保持 U 基本不变, 通过逆变器给永磁磁阻发电机补偿进去超前 E_0 90° 的直轴电流 I_d , 利用正凸极效应 (L_d 较大), 来调节直轴电枢反应的大小, 可使端电压 U 增加为 U' , 如图2中虚线所示。

收稿日期: 2006-03-20

作者简介: 吴义勇(1981-), 男, 河南籍, 硕士生, 研究方向为电力电子与电力传动;

孙旭东(1965-), 男, 辽宁籍, 副教授, 博士, 研究方向为电机及其控制, 电力电子与电力传动。

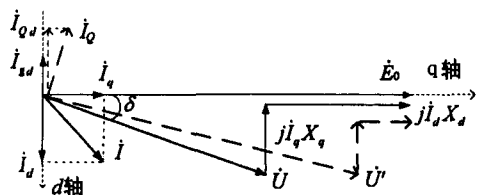


图 2 发电机的相量图

Fig.2 Phasor diagram of generator

反之,如果补偿滞后 E_0 90° 的 i_{qd} ,则可使端电压 U 降低。采用这种方法时,由于 i_d 和 U 不垂直,因此逆变器和发电机之间存在有功流动,逆变器的直流侧需要外加电源来维持母线电压,而且这种方法需要通过编码器来确定转子位置,安装调试比较复杂。

为了简化系统,同时又利用凸极效应的调磁原理,在与电压相量 U 垂直的方向补偿超前的无功电流 i_Q ,如图 2 所示(虚线部分)。由于一般发电机的功角 δ 较小,因此可认为 i_Q 中的主要分量为 d 轴电流 i_{Qd} 。所以,当 i_Q 超前于 U 时,发电机端电压 U 会增加。反之,如果在与电压相量 U 垂直的方向施加滞后的无功电流,则端电压 U 将降低。把这种通过给发电机补偿无功电流来调节端电压的方法称为无功电流补偿法。采用这种方法时,逆变器与发电机之间主要是无功电流在流动,逆变器只需要从发电机吸收很小的有功功率来补偿逆变器开关器件损耗和谐波损耗,所以,逆变器直流侧不需要外加电源就可以维持母线电压,降低了系统的成本。

以上分析表明:永磁磁阻同步电机的端电压可以通过无功电流补偿法来进行调节,调节同时将伴随着电机气隙磁场大小和功角的变化。由于永磁磁阻电机具有 L_d 比 L_q 大很多这一特性,因此,补偿入较小的无功电流,就可使直轴电枢反应发生显著的变化,从而实现稳定发电机输出电压的目的。

3 发电机数学模型与控制策略

永磁磁阻发电机无阻尼绕组,因此它在同步旋转 $dq0$ 坐标系中的电压方程可表述为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + p\psi_d - \omega\psi_q \\ u_q = R_s i_q + p\psi_q + \omega\psi_d \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

这里 u_d 和 u_q 是发电机 d 、 q 轴电压, R_s 是电枢电阻, i_d 和 i_q 是定子 d 、 q 轴电流, ψ_d 、 ψ_q 是磁链

的 d 、 q 轴分量, ψ_f 是永磁体所产生的磁链, L_d 和 L_q 是定子直轴和交轴电感。

永磁磁阻同步电机端电压的控制方法基于同步旋转坐标变换,如图 3 所示。该系统采用双闭环控制,其中外环是电压环,给定直流负载电压和母线电压的参考值 u_{dref} 、 u_{PNref} ,与反馈 u_{dc} 和 u_{PN} 比较后经过 PI 调节器分别得到无功、有功电流参考值 i_Q^* 和 i_P^* ,内环是电流环,经过 PI 调节器,最终得到空间电压矢量 u_s ,根据发电机的数学模型和 2.2 节的稳压原理,直接控制补偿电流,保持负载和母线电压的恒定。

采用 SVPWM 的调制方式,可以提高母线电压的利用率,而且很容易通过 DSP 实现。需要检测的量有负载电压 u_{dc} 、直流母线电压 u_{PN} 和补偿电流 i_A 、 i_B 。 i_Q 、 i_P 可由 i_A 、 i_B 通过 3/2 变换得出。通过过零比较电路和 DSP 处理器的运算,可以得到发电机电压的相位 θ 。

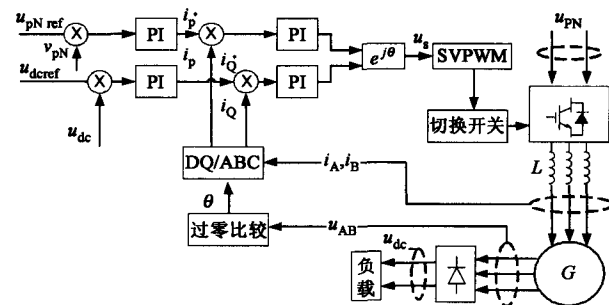


图 3 控制框图

Fig.3 Block diagram of control

4 系统仿真实验

为验证本文提出的控制方案,在 PSIM 5.0 平台下,建立了发电机及控制系统模型,对发电机转速和负载变化时系统直流侧负载电压的变化以及无功电流补偿效果进行了仿真实验。其中,发电机的主要参数设置如下(标么值):定子电阻 $R_s = 0.027$,交、直轴等效电感分别为 $L_q = 0.18$, $L_d = 0.54$,永磁磁链 $\psi_f = 1.14$ 。

仿真实验 1:未补偿时负载电压的变化曲线。仿真结果如图 4 所示。

第一阶段(0~18s):转速变化,负载额定。①在 0~4s,转速为 0.7(标么值);②4~6s,转速均匀增加至额定转速;③6~10s,维持额定转速;④10~12s,转速均匀增加至 1.2;⑤12~16s,转速维持 1.2 不变;

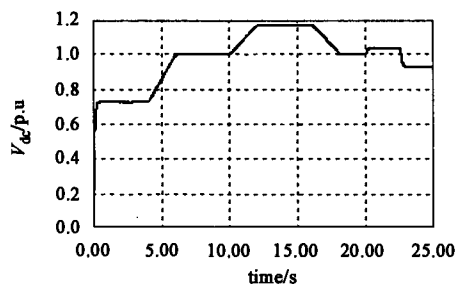


图 4 仿真实验 1: 未补偿时的负载侧直流电压的变化曲线

Fig.4 Simulation 1: waveform of load voltage without compensation

⑥16~18s, 转速均匀降低至额定转速。

第二阶段(18~25s): 额定转速下负载变化。

⑦18~20s, 额定负载; ⑧20~22.5s, 负载突减至 0.7 (标么值); ⑨22.5~25s, 负载突增至 1.3。

仿真实验 2: 无功电流补偿法的效果。

工况同上, 但在 2s 时加入无功电流补偿。仿真结果如图 5 所示。

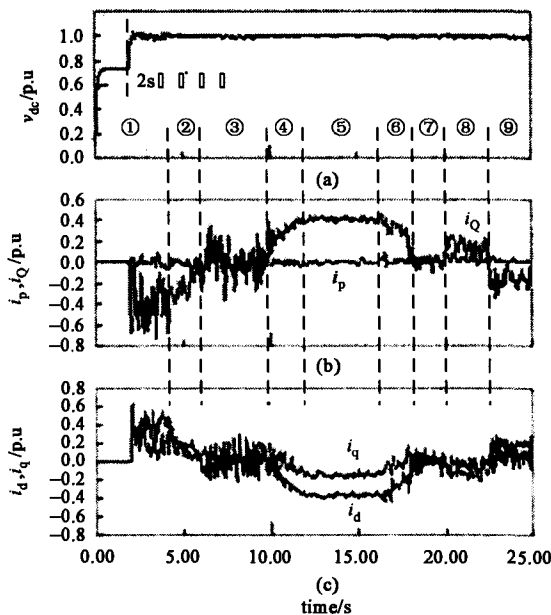


图 5 仿真实验 2: 加入无功电流补偿后的负载电压、有功/无功电流和 d 、 q 轴电流

Fig.5 Simulation 2: waveform of load voltage, reactive current, active current, d -axis current and q -axis current with compensation

由于负载电压 v_{dc} 是发电机端电压经不控整流后得到的, 所以 v_{dc} 的变化可以反映发电机端电压的变化。从图 4 可以看出, 在未补偿时, 随着原动机转

速或负载变化, v_{dc} 都会出现较大波动; 而加入补偿后, 如图 5(a) 所示, v_{dc} 可以保持稳定在额定电压。采用无功电流补偿法时, 保持有功电流 $i_p = 0$, 通过调节无功电流 i_q (如图 5(b)) 来使发电机电压稳定。图 5(c) 显示补偿的直轴电流 i_d 和交轴电流 i_q 。如果按照额定工况下(6~10s 和 18~20s)不补偿进行设计, 则在给定的发电机参数下, 当转速为 0.7 时, 需要补偿的无功电流不超过 0.5 倍额定电流; 而当负载变化 $\pm 30\%$ 时, 需要补偿的无功电流不超过 0.2 倍的额定电流。仿真实验结果表明, 这种控制方法是可行的, 不仅可以维持负载电压稳定, 而且补偿电流不大。

5 结论

本文提出了用于一种新型的永磁磁阻发电机的控制系统。采用与发电机并联的逆变器来补偿直轴电枢反应, 避免了全功率变换, 可有效地减小变流器容量。仿真实验表明, 当原动机转速和负载在一定范围内变化时, 通过补偿无功电流, 可以实现对发电机输出电压的调节, 使之保持稳定, 从而验证了所提出的方法的有效性。

参考文献 (References):

- [1] 唐任远 (Tang R Y). 现代永磁电机理论与设计 (Modern permanent magnet machines theory and design) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1997.
- [2] K J Binns, T S Low. Performance and application of multi-stacked imbricated permanent-magnet generators [J]. Proc. Inst. Elect. Eng., 1983, 130(6): 407-414.
- [3] B J Chalmers. Performance of interior type permanent-magnet alternator [J]. IEE Proc.: Elec. Power Applicat., 1994, 141(4): 186-190.
- [4] H R van Niekerk. Permanent magnet alternators for stand alone electricity generation [A]. IEEE 4th AFRICON [C]. South Africa, 1996. 451-455.
- [5] Naoki Yamamura, Muneaki Ishida, Takamasa Hori. A simple wind power generating system with permanent magnet type synchronous generator [A]. IEEE PEDS'99 [C]. Hong Kong, 1999. 849-854.
- [6] Ojo O, Omozusi O. Modeling and analysis of an interior permanent-magnet DC-DC converter generator system [A]. IEEE PESC'97 [C]. St. Louis, CA, USA, 1997. 929-935.
- [7] Mizuno Takyuki, C O Kabushiki, K Meidensha. Hybrid excitation type permanent magnet synchronous motor [P]. European Patent: 941056335, Dec. 4, 1994.
- [8] Chalmers B J, Akmesse R, Musaba L. Design and field-

- weakening performance of permanent-magnet /reluctance motor with two-part rotor [J]. IEEE Proc. - Electric Power Applications, 1998, 145(2): 133-138.
- [9] 张宏杰,唐任远,励庆孚 (Zhang Hongjie, Tang Renyuan, Li Qingfu). 混合励磁永磁同步发电机的原理与设计 (Theory and design of hybrid excitation permanent magnet synchronous generators) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2002, 21(1): 29-32.
- [10] 孟明,许镇琳 (Meng Ming, Xu Zhenlin). 低电压调整率交流永磁发电机的设计 (Design of permanent magnet alternator with low voltage regulation) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2004, 23(3): 47-50.

Voltage control of permanent-magnet/reluctance generator

WU Yi-yong, SUN Xu-dong, CHAI Jian-yun

(State Key Lab of Power Systems, Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The terminal voltage of a common permanent-magnet generator varies with its rotating speed and load due to its constant permanent-magnet flux, which resulting in unstable quality of power supply. In this paper, based on the equivalent phasor diagram of permanent-magnet/reluctance generator in steady-state condition, a new voltage control method for such a generator is proposed. The terminal voltage amplitude of the generator is maintained to be constant by an electronic power converter connected in parallel with the generator to compensate the reactive current required by its excitation. The structure of the generator system, the compensation principle, the mathematical model of the generator, and the closed-loop system of voltage control method are introduced in the paper. Simulation results verify that the terminal voltage amplitude can be held invariable by using the proposed voltage control strategy when the rotating speed and the load vary in a certain range. Besides, the compensate current is small.

Key words: permanent-magnet/reluctance generator; voltage control; inverter

(上接第 33 页, cont. from p.33)

- [11] Zimmerman R, Gan D. MATPOWER: A matlab power system simulation package [OL]. <http://www.pserc.cornell.edu/matpower>.
- [12] 俞俊霞,赵波 (Yu Junxia, Zhao Bo). 基于改进粒子群优化算法的最优潮流计算 (Improved particle swarm optimization algorithm for optimal power flow problem) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proc. CSU-EPSA), 2005, 17(4): 83-88.
- [13] 唐剑东,熊信银,吴耀武,等 (Tang Jiandong, Xiong Xinyin, Wu yaowu, et al.). 基于人工鱼群算法的电力系统无功优化 (Reactive power optimization of power system based on artificial fish-swarm algorithm) [J]. 继电器 (Relay), 2004, 32(19): 9-12.

Artificial fish school algorithm for optimal power flow problems

LIU Yao-nian, LI Ying-hong, ZHANG Bing-bing, LI Chun-liang

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: A new algorithm is presented to solve OPF problem using AFSA technique in this paper. Incorporation of non-stationary assignment penalty function in solving OPF problem can significantly improve the convergence and accuracy of AFSA. The proposed AFSA method is demonstrated and compared with PSO approach and GA approach on the standard IEEE 30-bus system. The investigations reveal that the proposed method is efficient in solving OPF problem.

Key words: artificial fish school algorithm (AFSA); non-stationary multi-stage assignment penalty function; optimal power flow(OPF)