

基于自适应复合控制的同步电机软起动 自动准同期并网控制方法

金光哲,徐殿国,高 强,寇佳宝,李志城

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 相角滑差的稳定是同步电机软起动系统中自动准同期装置并网成功的关键要素。分析得出了在双闭环调速系统中,电流环动态特性非理想条件下,采用速度比例积分控制器会引起滑差的不稳定,因此提出了自适应复合速度控制方法。在升速阶段采用单比例自适应速度控制算法,克服了传统比例控制器无法消除静差的问题;在准同期阶段,采用了基于相角滑差的准同期控制算法,解决了滑差不稳定的问题,并给出了可靠的并网判决策略。实验证明了自适应复合速度控制算法的正确性,最后运用该算法实现了同步电机软起动系统可靠并网。

关键词: 自动准同期; 复合速度控制; 相角滑差; 同步电机; 并网; 自适应控制; 软起动

中图分类号: TM 341

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.016

0 引言

大功率同步电动机的起动及并网困难是其应用的重大障碍,并成为限制产业发展的重大技术难题。自动准同期装置是大功率同步电动机软起动装置中非常重要的组成部分。准同期装置并网时,确保电网电压与电机端电压相位一致是至关重要的,特别是大功率同步电动机并网时,相位差引起的并网冲击电流会对电网质量以及电网的稳定性等造成较大的影响^[1-5]。

确保并网时刻相位一致,难点在于并网指令发出到接触器主触头闭合需要一定的时间,要在控制算法中,预估出这段时间内相角差的变化量,即准确

计算出相角导前角 d 。针对导前角的预报,文献[6-7]提出了微分预报法。微分预报法认为滑差是稳定的,相角变化量与合闸时间成线性关系,但测量误差会随着合闸时间变大;文献[8-9]采用积分预报的原理,可以极大减少噪声对预报的误差,即使在加速度滑差或随机滑差的情况下,也能获得较准确的导前时间。但以上 2 种预报方法均假设电机在并网时速度恒定。实际上,发电机并网前速度可能是波动的,而且合闸时间越长,近似认为发电机恒速计算出的合闸角误差越大。文献[10-12]提出的滑差预报的分析方法,能较准确地描述发电机匀速或变速情况下的相角变化。文献[13]将模糊控制应用于准同期并网判决中,用模糊判决提高并网可靠性。上述文献通过合闸前滑差的变化预估相角导前角并提出了有效的算法,但对并网合闸指令给出之后并网接触器合闸这段时间内的滑差变化无能为力。无论采用何种

收稿日期:2013-10-28;修回日期:2014-01-17

基金项目:国家发改委重大技术产业开发项目

Project supported by the NDRC Major Technology Industrial Development Project

Design of multi-channel DC supplementary damping controller for subsynchronous and low-frequency oscillation suppression

ZHAO Rui, LI Xingyuan, LIU Tianqi, WANG Yuhong, YANG Yiqiang, LI Kuan

(School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The coexistence of subsynchronous oscillation and low-frequency oscillation in actual AC-DC system operating in island mode is analyzed by the matrix pencil method and the order-reduced model retaining its essential characteristics is obtained, based on which, a multi-channel DC supplementary damping controller is designed. Band-pass filters are adopted to separate the subsynchronous and low-frequency oscillations and reduce the mutual impact between two oscillation modes. The gain, phase, output limit and filter parameters of each channel are separately tuned to support proper damping for the oscillation in different bands for subsynchronous and low-frequency oscillation suppression. EMTDC/PSCAD simulation verifies the effectiveness of the designed controller.

Key words: subsynchronous oscillation; low-frequency oscillation; DC supplementary damping control; "San-Hua" Power Grid; damping

预报算法,滑差的稳定是确保并网合闸成功的必要因素。

本文首先对双闭环调速系统中,在电流环非理想状态下,采用速度 PI 控制算法会引起相角滑差产生不稳定的现象进行了仿真分析,并基于速度环用比例环节时可以有效避免相角滑差不稳定的问题,提出了基于自适应复合控制的自动准同期控制方法。实验结果表明,该算法可以有效避免准同期阶段滑差的不稳定,提高系统并网的可靠性。

1 传统 PI 算法在准同期应用中存在的问题

自控变频式同步电动机软起动装置(简称 LCI)是一种交直交电流型变频器,主要由进线电抗器、晶闸管三相全控整流器、直流平波电抗器、晶闸管三相全控逆变器构成。晶闸管三相全控整流器将三相交

流电源整流成 6 脉波的直流电流,经过平波电抗器滤波后,再经三相全控逆变器将电流逆变为交流方波电流,施加于待起动电动机定子侧实现电动机的变频软起动过程。自控变频式同步电动机软起动装置具有结构简单、输出频率高、起动电流可控、对电网冲击小等显著优点。其系统结构框图如图 1 所示。

在实际传动系统中,大多采用速度外环、电流内环的双闭环调速系统。同步电机的电流受到电动机的结构、检测电路的精度、功率器件的开通延时等因素的制约,限制了电流控制的精度,影响了电流环的动态特性^[14]。在 LCI 系统中,平波电抗器过大,会使电流响应变慢,影响电流调节的动态特性,增加系统成本;平波电抗器过小,将使电流脉动加大,电流检测与控制变得困难。因此在实际系统中,很难做到完全理想的电流响应。

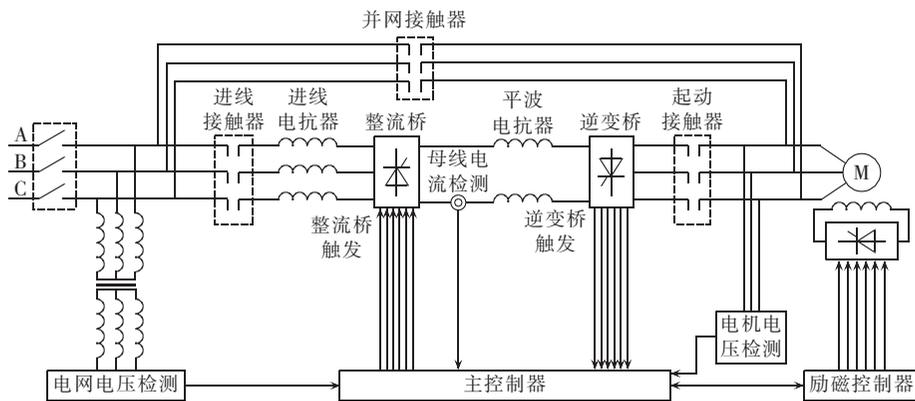


图 1 同步电动机自控变频软起动系统框图

Fig.1 Block diagram of synchronous motor soft starting system with adaptive variable-frequency control

图 2 为双闭环调速系统的动态结构框图^[15]。图中, U_n^* 为转速给定电压; U_n 为转速反馈电压; U_i^* 为电流给定电压; U_i 为电流反馈电压; T_m 为机电时间常数; C_e 为电动势系数。为模拟实际系统,在实际仿真中加入非线性环节。

图 3 为不同速度控制器下的仿真波形,从图 3(a)中可以看出当速度调节器采用比例积分环节时,频率稳态误差较小,但是因非线性干扰的存在,转速出现小范围不规则的波动现象。将频率误差做积分,即相当于计算相角滑差,从图 4(a)中可以看出积分后波形斜率的一致性较差。从图 3(b)与图 4(b)可以看出,当速度调节器采用单比例环节时,转速在小于给定转速下稳定,稳态误差无法消除,但将频率误差做积分后的波形斜率一致性很好。因频差较大,图 4(b)的滑差曲线比图 4(a)的相角滑差曲线快很多。在准同期并网系统中,滑差曲线不能太快,因此应尽可能减小频差。

在准同期并网过程中,并网指令发出后如果出现滑差不稳定,将导致之前计算的相位超前角不准确。

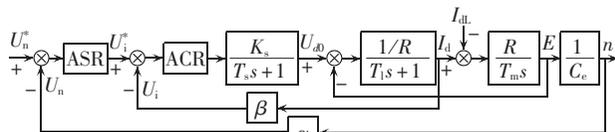
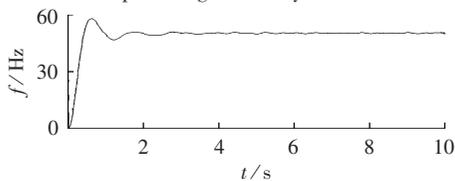
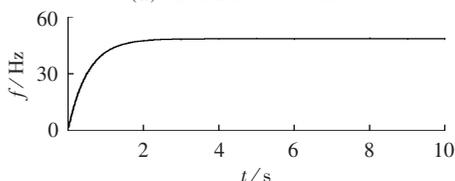


图 2 双闭环调速系统的动态结构框图

Fig.2 Dynamic structure of dual close-loop speed regulation system



(a) 速度控制器采用 PI 环节



(b) 速度控制器采用单比例环节

图 3 不同速度控制器下频率仿真波形

Fig.3 Simulative frequency waveforms for different speed controllers

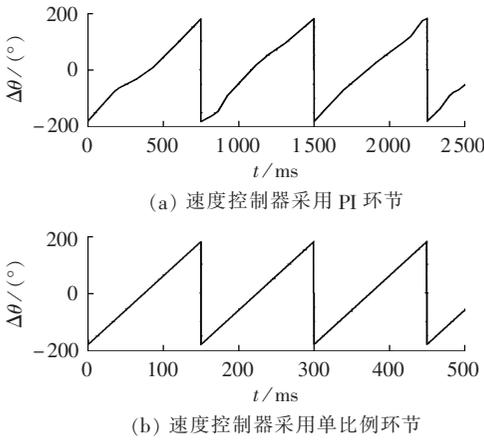


图 4 不同速度控制器下滑差仿真波形
Fig.4 Simulative slip waveforms for different speed controllers

因此保证滑差的稳定对并网成功是至关重要的。滑差稳定本质是电机的转速稳定。虽然 PI 算法可以使频率的稳态误差减小,但也会使频差不稳定,从而使滑差的一致性变差^[16]。当速度环只有比例环节的情况下,虽然频率的稳态误差无法消除,但却能使频差相对稳定,得到较为理想的滑差曲线。根据上述特点,本文提出了基于自适应复合控制的自动准同期算法。

2 基于自适应复合控制的准同期算法

同步电动机起动并网的理想条件是并网接触器两侧电压的 3 个状态量全部相等,尤其对相角差的要求更为严格,必须确保相位差为 0 时完成并网。而相角滑差的稳定是确保并网时刻满足相位要求的必要前提。电流内环非理想状态下,PI 算法会产生相角滑差不稳定,无法准确预估出并网导前角。本文针对该问题采用单比例环节的速度控制器,并通过自适应算法达到调频的目的。

同步电动机软起动并网系统根据不同阶段可分为升速过程、准同期过程和并网判决过程。通过检测电网电压及电机端电压的过零点可以检测其相位信息和频率信息。

2.1 升速过程

当速度控制器采用单比例环节时,稳态误差将无法完全消除。稳态误差与比例系数的倒数成正比,比例系数越大,稳态误差越小,但是比例系数过大将使系统不稳定。因此在比例系数一定的情况下,需要一套自适应算法来消除稳态误差。

稳态时,转速调节器的输出为:

$$(\omega^* - \omega)K_\omega = i_d^* \quad (1)$$

其中, ω^* 为转速给定; ω 为实际输出转速; K_ω 为速度调节器的比例系数; i_d^* 为电流给定。

假设电流环控制周期远高于速度环的控制周

期,因此令 $i_d^* = i_{d0}$ 。

因为电磁转矩 $T_e = C_m i_d - C_r i_d^2$,其中 C_m 为电磁转矩常数, C_r 为反应转矩常数,当忽略反应转矩时 $C_r = 0$ 。

此时有:

$$T_e = C_m i_d \quad (2)$$

转速稳定时有:

$$T_e = T_L \quad (3)$$

其中, T_L 为包括电动机空载转矩在内的负载转矩。

由式(1)~(3)得:

$$C_m K_\omega (\omega^* - \omega) = T_L \quad (4)$$

根据上述公式,假设 $N-1$ 时刻转速给定为 $\omega_{(N-1)}^*$,

$\omega_{(N-1)}^*$ 对应的稳态转速为 $\omega_{(N-1)}$, N 时刻速度给定为 $\omega_{(N)}^*$,

$\omega_{(N)}^*$ 对应的稳态转速为 $\omega_{(N)}$ 。那么有:

$$C_m K_\omega (\omega_{(N-1)}^* - \omega_{(N-1)}) = T_L \quad (5)$$

$$C_m K_\omega (\omega_{(N)}^* - \omega_{(N)}) = T_L \quad (6)$$

将式(5)、(6)相除,整理得:

$$\omega_{(N)}^* = \omega_{(N-1)}^* + \omega_{(N)} - \omega_{(N-1)} \quad (7)$$

系统最终状态可以认为 $\omega_{(N)}$ 为电网频率 ω_G ,那么式(7)可写为:

$$\omega_{(N)}^* = \omega_{(N-1)}^* + \omega_G - \omega_{(N-1)} \quad (8)$$

可通过式(8)得到最终的转速给定。考虑到调节频率大于电机的惯量,为减小超调量,式(8)可写为:

$$\omega_{(N)}^* = \omega_{(N-1)}^* + (\omega_G - \omega_{(N-1)}) / K_v \quad (9)$$

其中, K_v 为速度调节器的升速阶段转速调节系数, K_v 越大,超调量越小,调节速度越慢。最终采用式(9)完成升速过程,其流程图见图 5。

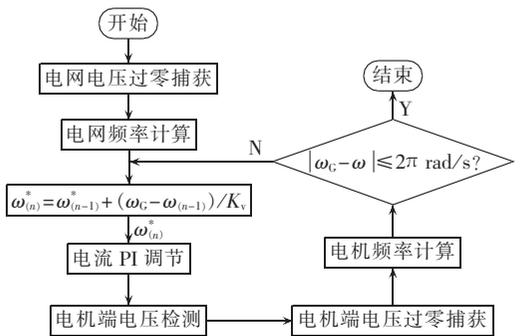


图 5 升速阶段程序流程图

Fig.5 Flowchart of speedup stage

2.2 准同期阶段

当转速接近额定转速后,相角滑差应跟随预设的滑差角频率,即 $\omega_{sl} = \omega_G - \omega$,其中 ω 为电动机角频率。由于在准同期阶段,频率已接近额定值,因此需要对电机频率进行微调。在准同期阶段,将以电机与电网的相位差变化率替代电机频率作为系统的输入,通过式(10)来微调转速给定,当滑差满足式(11)时,将不改变转速给定。通过相位的变化计算滑差角频率的优点是可以直观地看出电网与电机相位的相对变化速率,并可以直接应用到并网判决中,减小程

序的计算量。

$$\omega_{s(n)}^* = \omega_{s(n-1)}^* + \frac{1}{K_s} \left(\frac{\theta_{(n)} - \theta_{(n-1)}}{T_s} - \omega_{si} \right) \quad (10)$$

$$\omega_{si} - \Delta\omega \leq \frac{\theta_{(n)} - \theta_{(n-1)}}{T_s} \leq \omega_{si} + \Delta\omega \quad (11)$$

其中, $\Delta\omega$ 为允许的角频率误差; $\theta_{(n)}$ 、 $\theta_{(n-1)}$ 为 n 、 $n-1$ 时刻电机端电压相位; $\omega_{s(n)}^*$ 、 $\omega_{s(n-1)}^*$ 为准同期阶段 n 、 $n-1$ 时刻的转速给定; T_s 为相位采样周期; K_s 为准同期转速调节系数, 作用与式(9)中的 K_v 相同。

图 6 为准同期阶段程序流程图。因为滑差角频率为 $\omega_{si} = \frac{\theta_{(n)} - \theta_{(n-1)}}{T_s}$, 从图 6 中可以看出, 不需要计算出频率, 只需要采样相位信息, 就可完成准同期计算过程。

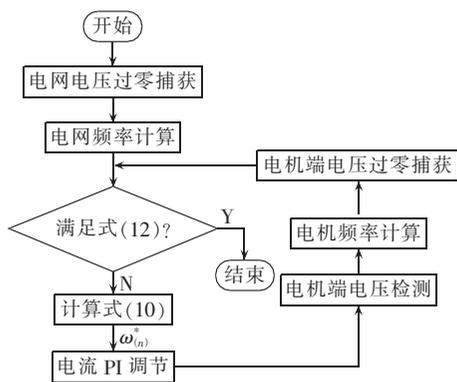


图 6 准同期阶段程序流程图

Fig.6 Flowchart of quasi-synchronization stage

图 7 为自适应复合速度控制系统框图, 图中 $K_{\omega} = 1/(K_v T_{on})$, $K_e = 1/(K_s T_{on})$, T_{on} 为频率控制周期, i_d^* 为电流给定, i_d 为反馈电流。

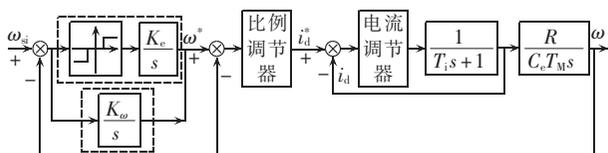


图 7 自适应复合速度控制系统框图

Fig.7 Block diagram of adaptive complex speed control system

2.3 并网判决阶段

当电动机端电压与电网电压幅值差在 5% 以内, 且相位变化速度满足式(11)时, 进入并网判决阶段。并网合闸的判定必须要考虑并网接触器合闸过程中相位的变化, 这样才能确保在真正并网时刻相位差为 0。相位差的判决采用式(12)。

$$\omega_{si} T_{KM} - \Delta\delta \leq \delta_i \leq \omega_{si} T_{KM} + \Delta\delta \quad (12)$$

其中, δ_i 为合闸时刻相角; $\Delta\delta$ 为合闸允许的相角误差; ω_{si} 为滑差角频率; T_{KM} 为接触器合闸时间。

因此通过式(9)、(10)、(12)即可完成同步电机的起动及并网控制。

3 实验结果

实验平台采用 10 kV/1000 kW 的同步电动机作为传动电机, 采用晶闸管串联的 10 kV 自控变频式软起动装置作为起动设备, 由变频器拖动一台异步电动机作为负载, 实验平台的系统框图如图 8 所示。

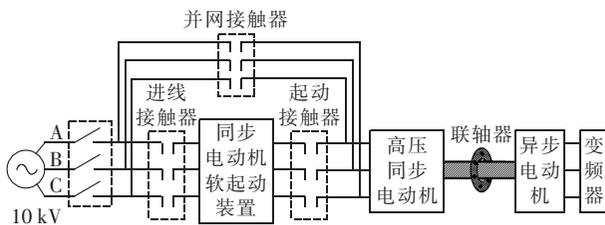


图 8 实验平台系统框图

Fig.8 Block diagram of experimental system

电网电压经过电压互感器, 滤波调理电路滤掉高次谐波, 经过过零比较电路, 变成方波信号。考虑到电机起动的低速阶段, 互感器无法准确检测低频信号, 因此, 电机端电压通过电阻分压, 再经过高精度隔离运放及滤波电路, 最后变成方波信号。通过 2 个方波过零点的比较及过零点的宽度来计算电网电压和电机端电压的相位和频率。

图 9 为不同 K_v 下的转速阶跃响应波形, 从波形中可以看出 K_v 越小, 频率的超调量越大。图 10 为直流母线电流波形, 在速度单比例控制下电流给定相对稳定, 对电流环的动态要求较低, 输出的电流较稳定。图 11 为速度控制器分别采用 PI 环节和单比例环节时的频率波形和滑差波形。从波形中可以看出采用单比例环节速度控制器的滑差很稳定, 为有效估算导前角及可靠并网创造了条件。图 12 为并网时刻电网电压与电机端电压波形。实验采用的真空接触器在控制器发出指令到接触器合闸需要 200 ms, 阶跃信号为控制器合闸信号和接触器触点反馈信号, 即上阶跃表示合闸信号给定时刻, 下阶跃为接触器主触点合闸时刻。从图 12 中可看出在稳定的滑差下, 并网判决可以准确预估出合闸导前角, 并网时刻

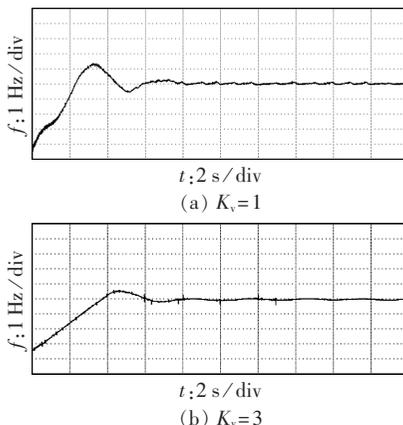


图 9 不同 K_v 下的转速阶跃响应波形

Fig.9 Response to speed step change for different K_s

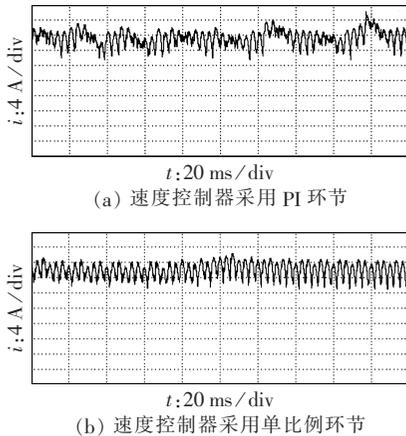


图 10 不同速度控制器下的直流母线电流波形
Fig.10 Waveforms of DC bus current for different speed controllers

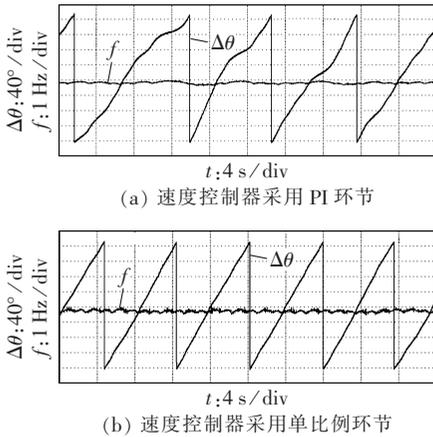


图 11 不同速度控制器下的滑差波形与电机频率波形

Fig.11 Frequency waveforms of slip and motor for different speed controllers

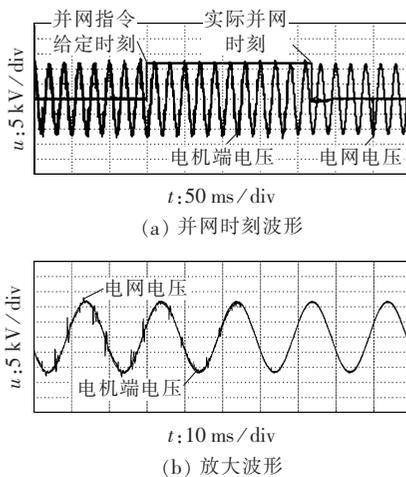


图 12 电网电压与电机端电压并网波形
Fig.12 Waveforms of grid voltage and motor terminal voltage during grid-connection

相位差几乎为 0。图 13 为电机并网三相电流波形,通过反复的实验发现,装置并网的电流冲击可以限定在额定电流的 20% 以内。

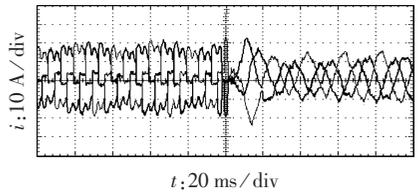


图 13 并网三相电流波形
Fig.13 Waveforms of three-phase grid-connection current

4 结语

在准同期并网场合,为了克服采用 PI 环节时因电流调节器动静态特性的限制产生的频率脉动对相角滑差的不利影响,本文提出了基于自适应复合速度控制的准同期并网控制方法。升速阶段采用了具有自适应功能的单比例环节的速度控制算法,解决了比例控制器无法克服静差的问题;提供了基于相角滑差的准同期控制算法,解决了滑差不稳定的问题。实验结果表明,该算法适用于自动准同期并网场合,验证了算法的正确性与可行性。

参考文献:

- [1] 高石炳. 非同期并列的危害及闭锁装置的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2003, 13(7): 115-116.
GAO Shibing. The harm of asynchronous juxtaposition and the operation of fastener[J]. SCI/TECH Information Development & Economy, 2003, 13(7): 115-116.
- [2] 杨东俊, 丁坚勇, 李继升, 等. 同步发电机非同期并网引起强迫功率振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 99-103.
YANG Dongjun, DING Jianyong, LI Jisheng, et al. Analysis of power system forced oscillation caused by asynchronous parallelizing of synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 99-103.
- [3] 韩晋, 黄健. 同期捕捉算法的改进及实现[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 108-112.
HAN Jin, HUANG Jian. Improvement and implementation of sync-capture algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 108-112.
- [4] 叶念国. 由我国同期装置的现状所引发的思考[J]. 电网技术, 1998, 22(12): 74-77.
YE Nianguo. Current situation and existing problems of current synchronizers in China[J]. Power System Technology, 1998, 22(12): 74-77.
- [5] 彭晓涛, 王少荣, 程时杰. 高性能微机自动准同期装置[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(10): 70-73.
PENG Xiaotao, WANG Shaorong, CHENG Shijie. A high performance microprocessor-based automatic quasi-synchronization device [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(10): 70-73.
- [6] 李俊霞, 涂仁川, 严兵, 等. 一种微机型自动准同期装置[J]. 继电器, 2002, 30(9): 53-54.
LI Junxia, TU Renchuan, YAN Bing, et al. A microprocessor based automatic synchronizing device[J]. Relay, 2002, 30(9): 53-54.

- [7] 张晓英,党存禄,王树东. 基于单片机和 CPLD 的同步发电机自动准同期装置设计[J]. 电力自动化设备,2007,27(8):102-105.
ZHANG Xiaoying,DANG Cunlu,WANG Shudong. Design of generator automatic quasi-synchronizing device based on micro-processor and CPLD[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(8):102-105.
- [8] 鲁文军,刘觉民. 同期装置导前时间误差分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):112-115.
LU Wenjun,LIU Juemin. Analysis of lead time error for synchronization device[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):112-115.
- [9] 黄纯,何怡刚,江亚群. 一种新的自动准同期并列算法的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(3):60-64.
HUANG Chun,HE Yigang,JIANG Yaquin. Novel algorithm for automatic synchronization[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(3):60-64.
- [10] 李振然. 基于递推最小二乘算法和自适应采样的微机自动准同期[J]. 电工电能新技术,1995(3):1-6.
LI Zhenran. According to recursive least square algorithm and adaptive sampling to realize microcomputer automatic accurate synchronizer[J]. Advanced Technology Electrical Engineering and Energy,1995(3):1-6.
- [11] 陈庆旭,余华武. 一种面向多对象的自动准同期装置[J]. 电力自动化设备,2010,30(4):105-108.
CHEN Qingxu,YU Huawu. Quasi-synchronization device with line-selection function[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(4):105-108.
- [12] 江亚群,何怡刚,黄纯. 双单片机实现的双原理自动准同期并列装置[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):87-90.
JIANG Yaquin,HE Yigang,HUANG Chun. Dual-principle-based automatic quasi-synchronization device with two MCUs[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(4):87-90.
- [13] 李瑾鸿. 应用模糊控制原理在差频并网下的自动准同期算法研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(2):96-105.
LI Jinhong. Algorithm research of the automatic synchronization under difference frequency power grid using fuzzy control principle[J]. Power System Protection and Control,2009,37(2):96-105.
- [14] 董璇,都洪基,郭新红. 基于 Simulink 的直流调速系统仿真及参数优化[J]. 电力自动化设备,2008,28(2):89-92.
DONG Xuan,DU Hongji,GUO Xinhong. DC motor control system simulation and parameter optimization based on Simulink[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(2):89-92.
- [15] 管西华. 高压变频器同步切换技术在大容量高压同步电机软启动中的应用[J]. 电机与控制应用,2012,39(6):52-57.
GUAN Xihua. Up transfer application of high voltage inverter in large synchronous motor soft starting[J]. Electric Machines & Control Application,2012,39(6):52-57.
- [16] 郭宏亮,王青,叶国铭. 永磁交流伺服系统的转速脉动分析[J]. 微特电机,2007(8):13-15.
GUO Hongliang,WANG Qing,YE Guoming. Analysis of rotation speed ripple for permanent magnet AC servo system[J]. Small & Special Electrical Machines,2007(8):13-15.

作者简介:



金光哲

金光哲(1981-),男,吉林吉林人,博士研究生,主要研究方向为大容量自控变频式同步电机软启动技术(E-mail:18258649@qq.com);

徐殿国(1960-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力电子与电力传动技术、照明电子技术、电机及控制技术、高压直流输电技术等;

高 强(1964-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为大功率电机驱动技术、中高压系统动态无功补偿技术、中压电机保护技术等;

寇佳宝(1990-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要研究方向为同步电动机软启动并网技术;

李志城(1989-),男,江西抚州人,硕士研究生,主要研究方向为同步电动机低速转子位置无速度传感器检测技术。

Automatic quasi-synchronization based on adaptive complex control for synchronous motor soft starting system

JIN Guangzhe, XU Dianguo, GAO Qiang, KOU Jiabao, LI Zhicheng

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Stable phase slip is crucial to the grid-connection of automatic quasi-synchronizing device in the synchronous motor soft starting system. Analysis reveals that, the application of PI speed controller in the dual close-loop speed control system may cause unstable phase slip if the dynamic characteristics of current loop are nonideal. A strategy of adaptive complex speed control is thus proposed, which adopts the single rate adaptive speed control algorithm to eliminate the static offset in its speedup stage while applies the quasi-synchronization control algorithm based on phase slip to make the phase slip stable in its quasi-synchronization stage. Reliable grid-connection judgment is also presented. The experimental results demonstrate its validity and the reliable grid-connection of synchronous motor soft starting system is realized.

Key words: automatic quasi-synchronization; complex speed control; phase slip; synchronous motors; grid connection; adaptive control; soft starting