

一种静止无功发生器的改进模糊自适应 PI 控制策略

吕广强, 刘潇逸

(南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘要:针对静止无功发生器(SVG)传统控制策略自适应调节能力不足的问题,对传统控制策略进行改进。在内环解耦控制的基础上,引入模糊控制对PI参数进行自适应调整,以提高SVG的补偿精确性。传统模糊PI控制以PI的初始参数为中心进行上下调整,因此调节范围有限。针对调节有限的问题,文中提出采用累加的方式调整PI参数,根据系统变化,在参数调整过程中,不再以初始参数作为调整基准,而是采用上一时刻的值作为基准进行调整,从而增大调节范围,实现PI参数的自适应调整。仿真分析表明,与现有的模糊PI控制策略相比,文中策略进一步提高了补偿精确性,增强了系统的动态特性。

关键词:静止无功发生器;解耦控制;PI参数;模糊控制;自适应

中图分类号:TM762

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)02-0023-06

0 引言

静止无功发生器(static var generator, SVG)因其补偿速度快,精确性较高,被广泛应用于电力系统的无功补偿。设计其控制策略时,除保证稳态补偿有效性外,还应注意提升其动态补偿精确性^[1-4]。尤其在用户侧,负载的动态变化比较频繁^[5-6],因此SVG的补偿需具备较强的自适应性。

内环解耦控制是目前SVG领域普遍采用的控制方法,基于dq坐标系设计,保证控制的静态稳定性^[7-11],但控制缺乏自适应性。文献[12-13]所提出的控制策略增强了控制的自适应性,但需要建立大量精确的数学模型,难以对模型的动态变化过程进行精确推算。文献[14]提出用模糊控制理论模仿人工智能的方式调节无功功率的大小,但缺乏系统性,无法保证控制过程中的稳定性和鲁棒性。文献[15-17]将模糊控制与PI控制器相结合,实现PI参数的自适应调整,保证控制过程的鲁棒性,但PI参数的调整以初始整定值为中心小幅度调整,自适应调节范围有限。文献[17]对于负载的变化仅考虑无功功率的变化,未考虑阻感参数变化对系统结构的影响。文献[18]采用实时观测的方式对系统进行监控,然后对控制器进行实时整定,但是增加了调试难度和工作量。

针对上述问题,对传统模糊PI控制进行改进设计,采用累加的方式调整PI控制比例增益系数和积分增益系数,增加调节范围,从而提高补偿的精确性和动态特性。

1 SVG的解耦控制分析

首先对SVG与电网并联的结构进行简化,可以得到SVG的主电路结构如图1所示。其中 e_{sa}, e_{sb}, e_{sc} 为电网三相电压值; e_a, e_b, e_c 为SVG交流侧输出电压值; i_a, i_b, i_c 为SVG交流侧输出电流; U_d 为SVG直流侧电容电压; R, L 分别为SVG交流侧电阻,电感有效值; S_1-S_6 为开关器件。

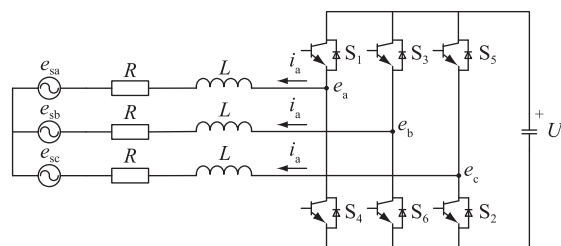


图1 SVG主电路结构

Fig.1 Main circuit diagram of static var generator

为了满足PI控制的稳定性,通常在dq坐标系下进行分析,得到dq坐标系下的电压关系式如下。

$$e_d = \left(Ri_d + L \frac{di_d}{dt} \right) + e_{sd} + \omega Li_q \quad (1)$$

$$e_q = \left(Ri_q + L \frac{di_q}{dt} \right) + e_{sq} - \omega Li_d \quad (2)$$

式中: $e_d, e_q, i_d, i_q, e_{sd}, e_{sq}$ 分别为各变量的d,q轴分量; ω 为电力系统的角频率。

相应的基于PI控制的算法如下。

$$e_d = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{dref} - i_d) + e_{sd} + \omega Li_q \quad (3)$$

$$e_q = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{qref} - i_q) + e_{sq} + \omega Li_d \quad (4)$$

式中： i_{dref}, i_{qref} 分别为补偿电流的 d, q 轴参考值； K_p, K_i 分别为 PI 控制的比例和积分系数。

从功率平衡角度来考虑直流侧电容电压的控制，直流侧电容的功率变化应该与交流侧的功率相等，可得到式(5)所示关系：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C U_{dc}^2 \right) = - (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (5)$$

可设计内环双解耦控制策略，如图 2 所示。

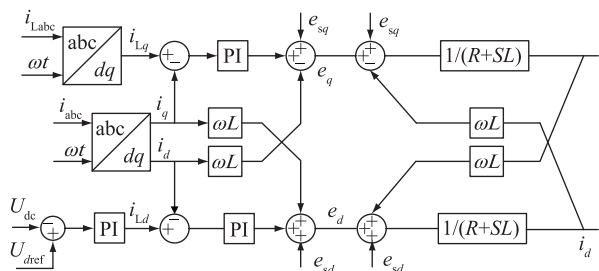


图 2 解耦控制框图

Fig.2 Block diagram of decoupling control

负载侧电流 i_{Labc} 通过 dq 变换提取出无功电流分量 i_{Lq} ，即无功参考电流 i_{qref} ，通过电压外环得到有功电流分量 i_{Ld} ，即有功参考电流 i_{dref} 。参考电流减去 SVG 实际补偿电流得到误差信号 e ，通过 PI 控制器调节得到相应参考电压。

该策略可实现系统稳态运行情况下正序无功的有效补偿，并充分考虑 PI 控制动态稳定性。该算法内环解耦控制器的 PI 参数与系统的 R, L 参数有关，负载侧参数变化也会对其造成影响。若运行过程中负载侧参数发生动态变化，那么已经整定好的 PI 参数不再适用，会存在无功补偿不足问题。

针对上述问题，引入模糊 PI 控制，并对其进行改进，设计适用于动态负载系统的自适应控制器，以此来替代图 2 中电流环的传统 PI 控制器。

2 自适应模糊 PI 控制器的设计

2.1 数据的模糊化处理

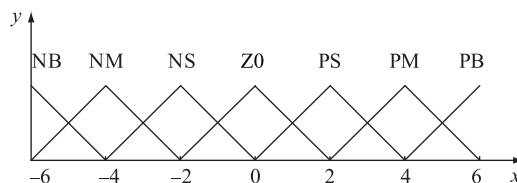
对于补偿值与参考值的误差 e 及其变化率 Δe 与 PI 参数的变化值 ΔK_p 和 ΔK_i 这 4 个参数，根据其最大变化范围进行划分，按相应比例统一映射到标准的论域上，然后将论域上的精确值转换到相应的模糊子集中去，并且用能代表大小关系的语言变量值来代替这些精确值。按照模糊划分定义模糊集合 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ，其分别表示 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}。

2.2 模糊推理

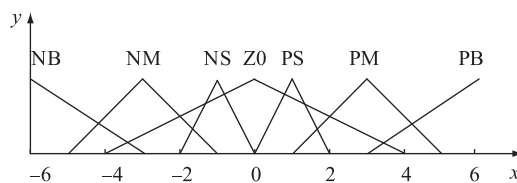
将已有的理论知识以及实际调试的经验总结为 IF() THEN() 形式的模糊规则，如 IF(e is NB)

and(Δe is NB) THEN(ΔK_p is PB) (ΔK_i is NB)，通过这些规则来控制偏差，使之在允许范围之内。

模糊推理可以得到 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 的模糊取值，再通过重心法去模糊化得到参数的准确调节值。隶属度函数采用三角隶属度函数，统一论域区间为 $[-6, 6]$ ，如图 3 所示。对于三角隶属度函数的区间划分，输入和输出有所区别，对于误差指令的输入，采用等量划分的形式，对于 PI 参数调整量的输出，采用非等量划分的形式。



(a) e 和 Δe 对应隶属度函数



(b) ΔK_p 和 ΔK_i 对应隶属度函数

图 3 三角隶属度函数

Fig.3 Triangle-shape grade of membership function

2.3 PI 控制增益系数的累加调整

求得 2 个数值的调节值之后，与原先的参数值相加就可以得到准确的 K_p, K_i 值。负载动态变化时，PI 参数的实时整定不容易实现，所以需实现自适应调整。传统自适应控制以 PI 初始参数为中心，小幅度上下调整。若系统运行过程中 R, L 参数发生动态变化，则 K_p, K_i 的值应做出较大调整。传统调整方式调节范围有限，为了应对负载动态变化的情况，对 K_p, K_i 的调整采用累加的形式，如图 4 所示。

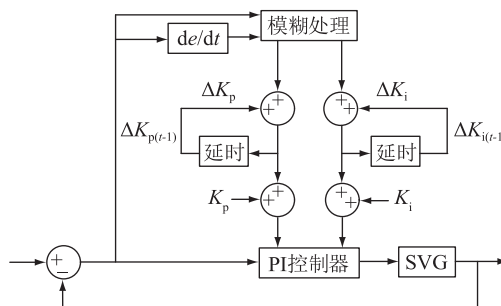


图 4 PI 参数调整方式

Fig.4 PI parameter adjustment method

在增量 ΔK_p 后设置延时环节，形成调整量的累加，每次都以上一时刻的 K_p, K_i 参数值为基准进行调整，而不是以初始参数为基准。反复累加调整，

直到满足系统所要求为止。考虑系统运行时,PI 参数可能会重新整定,若收到新的 K_p, K_i 整定信号,那么传递清零指令,累加量清零,重新进行调整,从而提高调整的范围和精度。

将所设计模糊自适应 PI 控制方法应用于系统控制中,图 5 为系统整体控制流程。

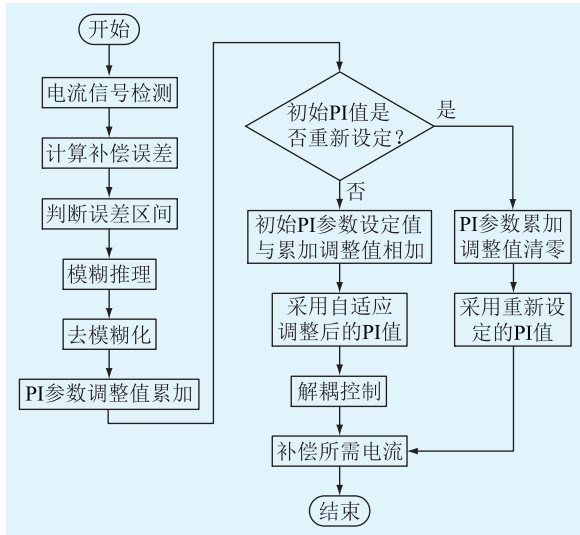


图 5 系统控制流程

Fig.5 Flow chart of system control

3 仿真分析

3.1 参数设计

通过 Matlab/Simulink 搭建仿真模型,系统结构如图 6 所示。

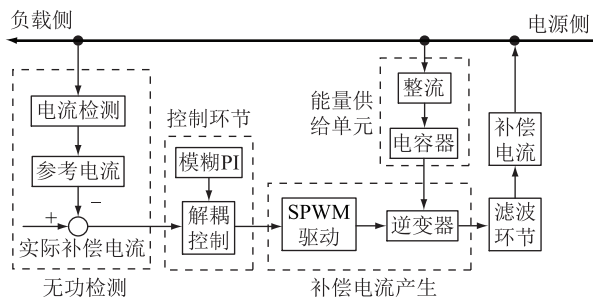


图 6 系统结构

Fig.6 System organization

为了体现出控制策略的持续有效性以及各个环节的对比性,仿真时间设置为 1 s。其中,系统参数为:交流额定电压 380 V,容量 100 kV·A,系统频率 50 Hz;主电路参数为:SVG 直流侧电容 5.64 mF,交流侧连接等效电感 3 mH,等效电阻 0.2 Ω。设置控制器的输入量 e 变化范围为 $[-10, 10]$,其变化率 Δe 范围为 $[-20, 20]$, ΔK_p 调整范围为 $[-8, 8]$, ΔK_i 调整范围为 $[-15, 15]$,设定 e 和 Δe 的模糊因子分别为 $k_1 = 3/5$ 和 $k_2 = 3/10$,设定 ΔK_p 和 ΔK_i 的解模糊

因子分别为 $k_3 = 4/3$ 和 $k_4 = 2.5$,将各变量变化范围统一映射到标准论域 $[-6, 6]$ 。

根据文献[19—21]并结合仿真经验,可总结出模糊规则如表 1 和表 2 所示。

表 1 ΔK_p 模糊规则

Table 1 The fuzzy rule of ΔK_p

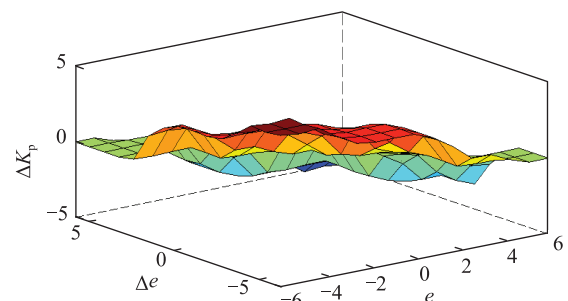
e	Δe						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_i 模糊规则

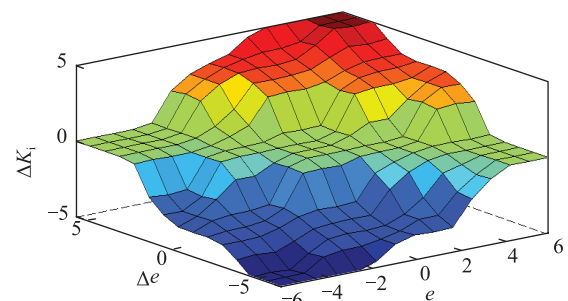
Table 2 The fuzzy rule of ΔK_i

e	Δe						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

通过仿真可得 PI 参数调整观测图如图 7 所示。



(a) ΔK_p 调整图



(b) ΔK_i 调整图

图 7 PI 参数调整图

Fig.7 PI parameter adjustment diagram

由图 7 可以看出,PI 参数的变化范围为 $[-6, 6]$,模糊控制器输出的调整值与解模糊因子相乘可输出 PI 参数的实际调节值。如图 7 所示,在模糊区间 ZO 范围内,PI 参数的调整量较小,且在中心区域调整量为 0,误差满足要求时不做调整;在误差及其变化率较大的区间,PI 参数调整量较大,通过及时的调整使得误差降低。

为验证模糊规则及调整方式的有效性,将设计的自适应 PI 控制器应用于动态负载系统中。

3.2 自适应控制仿真分析

考虑到间接电流控制方式响应速度较慢,文中采用直接电流控制方式,且仿真系统设为无穷大系统。为模拟负载动态变化的情况,设置 3 组阻感负载,具体参数及投入时间如表 3 所示。

表 3 负载参数
Table 3 Load parameters

负载	投入时间/s	阻值/ Ω	电感值/mh
1	0	1	5
2	0.4	0.8	4
3	0.7	1.2	6

SVG 投入时间为 0.1 s,根据设定动态负载进行仿真。为方便分析,以 A 相仿真情况为例说明。图 8 为 A 相补偿电流跟踪曲线,包括 A 相补偿指令值、SVG 的 A 相补偿电流以及补偿误差。

图 8(a)为未采用自适应控制的仿真结果,在 0.1 s 后,SVG 有效补偿无功电流,0.4 s 后投切第二组负载,补偿误差增大,误差达到 12 A 左右,0.7 s 后投入负载 3,误差再次增大,稳定后峰值达到 17 A 左右。

图 8(b)为 PI 参数以初始值为基准进行调整的仿真结果,调整量不作累加。对于负载的动态变化,补偿误差有所降低,在 0.4 s 后,误差峰值由 12 A 降低到 7 A,0.7 s 后,由 17 A 降低到 11 A,但误差还是略大。

图 8(c)为采用 PI 参数累加调整的自适应控制器的仿真结果,明显看出误差曲线几乎为一条直线。在 0.4 s 投切负载 2 后,通过自适应调节,误差峰值降低到 3 A,在 0.7 s 投切负载 3 后,降低到 4 A,相比于图 8(b)误差进一步降低。

图 9 为 A 相无功功率 Q 曲线,从 0.1 s 后 SVG 开始补偿后进行分析。从图 9 可以看出:(1)未采用自适应控制前,随着负载的动态变化,系统无功功率的补偿差额越来越大,在 0.4 s 后,A 相无功功率为 1 600 var,0.7 s 后,A 相无功功率为 3 000 var,补偿不完全;(2)PI 参数以其初始值为基准自适应

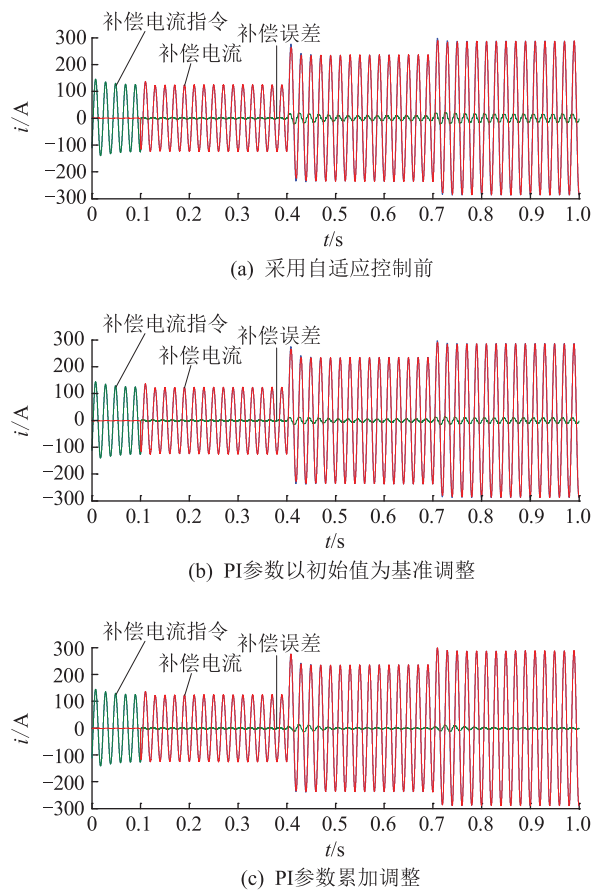


图 8 A 相补偿电流跟踪曲线

调整时,在 0.4 s 投入负载 2 后,系统无功功率明显降低,约为 600 var 左右,在投入负载 3 后,由于调节范围受限,A 相无功功率仍有 2 000 var 未补偿;(3)对 PI 参数进行累加调整时,负载动态变化时,无功功率有所波动,但很快通过自适应调节恢复稳定,无论是投切负载 2 或者负载 3 后,A 相无功功率均可控制在 150 var 以下。

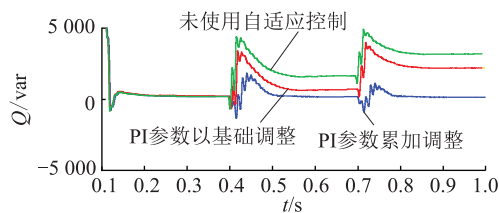


图 9 A 相无功功率曲线

Fig.9 Phase A reactive power curve

通过对不同 PI 参数调整的控制特性进行对比,可以看出,文中的 PI 参数累加调整方式可以使控制精度更高,当负载发生变化时,仍能实现稳定控制。

4 结语

针对三相电力系统负载动态变化的情况,设计一种 PI 参数累加调整的自适应控制策略,可以有效

提高 SVG 的补偿精确性,提高系统的稳定性和抗扰动性。与传统模糊 PI 控制相比,进一步降低负载动态变化时补偿电流与指令之间的跟踪误差,并且解决了无功功率补偿不完全的问题。下一步工作将在此基础上对系统的抗扰性进行研究,并完成实验验证。

参考文献:

- [1] 蔡欣灵,郝思鹏. 电网三相不平衡的度量与治理综述[J]. 电力工程技术,2019,38(5):185-192.
CAI Xinling,HAO Sipeng. Review of the measurement and control of three-phase unbalance [J]. Electric Power Engineering Technology,2019,38(5):185-192.
- [2] 巩华刚,臧朝伟. 基于 APF 的静止无功发生器应用研究[J]. 煤炭工程,2016,48(2):65-68.
GONG Huagang,ZANG Chaowei. Application of static var generator based on APF [J]. Coal Engineering,2016,48(2):65-68.
- [3] 梁有伟. 静止无功发生器 SVG 在低压配电网中的应用[J]. 电工技术,2018(17):130-132.
LIANG Youwei. Application of static var generator (SVG) in low distribution network [J]. Electric Engineering,2018(17):130-132.
- [4] 武稼祥,张国澎,艾永乐,等. 一种改进的模块化 SVG 并联交错调制方式[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(8):26-33.
WU Jiexiang,ZHANG Guopeng,AI Yongle,et al. An improved modular SVG parallel interleaving modulation method [J]. Power System Protection and Control,2019,47(8):26-33.
- [5] 方舟,孙奇珍,沈超,等. 基于高维随机矩阵的配电网用户侧用电行为分析[J]. 广东电力,2019,32(11):111-119.
HAO Fangzhou,SUN Qizhen,SHEN Chao,et al. Users electricity consumption behavior analysis in distribution network based on high dimensional random matrix [J]. Guangdong Electric Power,2019,32(11):111-119.
- [6] 钱科军,徐在德,陈振宇,等. 考虑用户舒适度的多样化负荷控制策略[J]. 智慧电力,2018,46(9):1-5.
QIAN Kejun,XU Zaide,CHEN Zhenyu,et al. Strategy of diversified load control considering user comfort [J]. Smart Power,2018,46(9):1-5.
- [7] 蒋美娜,马晓春. 基于 SVPWM 的静止无功发生器控制策略研究[J]. 电测与仪表,2017,54(3):72-77.
JIANG Meina,MA Xiaochun. Research of SVG based on SVPWM control strategy [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2017,54(3):72-77.
- [8] 郭克,高舜宇,郑雷,等. 静止无功发生器双环控制研究[J]. 机电工程技术,2015,44(12):14-17.
GUO Ke,GAO Shunyu,ZHENG Lei,et al. Dual loop control research of static var generator [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology,2015,44(12):14-17.
- [9] ZHANG Xiaobin,ZHONG Yanru. Research on the mathematical model and control strategy of static Var generator [C]// Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC),2010(3):1-6.
- [10] ZHA Congmei,XU Jiayun. Study on main circuit mathematical model and control method of advanced static var generator [C]//Applied Mechanics and Materials,2014(556):1789-1793.
- [11] 吴晓飞,崔巍,都鑫. 基于内模原理的煤矿静止无功发生器滑模电流解耦控制[J]. 煤炭技术,2017,36(7):306-308.
WU Xiaofei,CUI Wei,DU Xin. Decoupled current control of mine VSG with sling-mode control method based on internal model [J]. Coal Technology,2017,36(7):306-308.
- [12] 陈巍,吴捷. 静止无功发生器递归神经网络自适应控制[J]. 电力系统自动化,1999(9):33-37.
CHEN Wei,WU Jie. Adaptive control of static Var generator based on recurrent neural network [J]. Automation of Electric Power Systems,1999(9):33-37.
- [13] 雷邦军,费树岷. 静止无功补偿器(SVC)的一种新型非线性鲁棒自适应控制设计方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(30):65-70,11.
LEI Bangjun,FEI Shumin. A novel improved nonlinear robust adaptive control design method of SVC [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(30):65-70,11.
- [14] GHAFOUR A,ZOLGHADRI M R,EHSAN M,et al. Fuzzy controlled STATCOM for improving the power system transient stability [J]. Power Symposium,2007:212-216.
- [15] 戴祥臣,任国臣. SVG 无功功率稳定性控制策略的研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版),2015,35(5):290-294.
DAI Xiangchen,REN Guochen. Research on SVG reactive power stability control strategy [J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition),2015,35(5):290-294.
- [16] 李宁,韩如成,巩晶晶. 模糊控制在静止无功发生器中的应用[J]. 工业控制计算机,2014,27(3):76-77.
LI Ning,HAN Rucheng,GONG Jingjing. Study and application of fuzzy control on reactive power compensation [J]. Industrial Control Computer,2014,27(3):76-77.
- [17] 唐杰,罗安,欧剑波,等. 配电静止同步补偿器的模糊自适应 PI 控制策略[J]. 电工技术学报,2008(2):120-126.
TANG Jie,LUO An,OU Jianbo,et al. Voltage control strategy of D-STATCOM based on fuzzy-PI controller [J]. Transactions of China Electro Technical Society,2008(2):120-126.
- [18] 乔和,王思家. 三相四线制 SVG 的自适应 PI 双闭环控制方法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(4):434-439.
QIAO He,WANG Sijia. Three phase four wire SVG control method of an adaptive PI double closed loop [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2016,35(4):434-439.
- [19] 刘志江,夏成军,杜兆斌. 多端柔性直流输电系统直流电压模糊控制策略[J]. 电力工程技术,2017,36(2):21-26.
LIU Zhijiang,XIA Chengjun,DU Zhaobin. Research of DC voltage fuzzy control strategy for VSC-MTDC systems [J]. E-

lectric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 21-26.

- [20] ALLAGUI N Y, HALIMA D B, DERBEL A N. Fuzzy PI controller for mobile robot navigation and tracking [C]//2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), 2018: 1178-1183.
- [21] MAHAMMAD A H, JAMAL A A, MOHAMED A, et al. Quantum-behaved lightning search algorithm to improve indirect field-oriented fuzzy-PI control for IM drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 3793-3805.

作者简介:



吕广强

吕广强(1974),男,博士,副教授,研究方向为电能质量检测与治理、无功补偿等(E-mail:lgqiang1008@163.com);

刘潇逸(1993),男,硕士在读,研究方向为无功补偿技术。

An improved fuzzy adaptive PI control strategy for static var generator

LYU Guangqiang, LIU Xiaoyi

(College of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Regarding at the problem of inadequate adaptive regulation ability of traditional control strategy of SVG, the traditional control strategy is improved. On the basis of inner loop decoupling control, fuzzy control is introduced to adjust PI parameters adaptively to improve the compensation accuracy of SVG. The traditional fuzzy PI control takes the initial PI parameters as the center and adjusts up and down, and the adjusting range is limited. Aiming at this problem, the method of accumulating PI parameters is proposed to increase the adjusting range. According to the changing system, not only the initial values but also the last moment values is not as the referring values during adjusting the parameters. And the PI parameters are adjusted adaptively according to the change of error signal. The simulation results show that compared with the existing control strategies, the compensation accuracy is further improved and the dynamic performance of the system is enhanced.

Keywords: static var generator; decoupling control; PI parameter; fuzzy control; self-adaption

(编辑 方晶)