滑模变结构控制在含分布式电源的配网中的应用

黄悦华[1]，朱 杰[1]，高梅玲[1]，刘荆飞[2]

（1.三峡大学电气信息学院，湖北 宜昌 443002；2.中国长江三峡工程开发总公司，湖北 宜昌 443000）

摘要：介绍了分布式电源并网后对配电网产生的影响，以及简化的含分布式电源的配电网模型。针对分布式发电的并网接口技术，引入滑模变结构控制系统以减轻分布式电源对配网产生的影响，并设置一定宽度的滞环带宽来消除滑模变结构控制中由于切换频率过高而带来的抖振问题。仿真结果表明该方法在一定程度上提高了分布式电源电压突变后恢复稳定状态的速度和效果，保证了电网的供电质量和安全可靠性。

关键词：分布式电源；配电网；并网接口；滑模变结构控制；滞环带宽；供电质量

Application of sliding mode variable structure controller in distribution networks with distribution generation

HUANG Yue-hua[1]，ZHU Jie[1]，GAO Mei-ling[1]，LIU Jing-fei[2]

(1. College of Electrical and Information Engineering，China Three Gorges University，Yichang 443002，China;
2.China Three Gorges Project Corporation，Yichang 443000，China)

Abstract: The impact of distributed generation (DG) which connected to the distribution network is introduced in this paper. A simplified model of distribution network with DG is established. Sliding mode variable structure controller is introduced to reduce the impact of the distributed network by the interface of DG. The controller sets an annual in order to eliminate the chattering problems because of the high frequency of the process of sliding control. The simulation and experimental test results show that the proposed sliding mode variable structure controller improves the speed and effect when the voltage of DG come back from chop to stable state, which ensures the supply quality and safety and reliability of the network.

Key words: DG; distribution network; gird-connected interface; sliding mode variable structure control; hysteresis bandwidth; supply quality

中图分类号：TM712 文献标识码：A 文章编号：1674-3415(2009)15-0075-04

0 引言

随着经济的发展和科技的进步，人们对电能质量、能源效益以及环保问题日益重视。利用风能、太阳能、燃料电池等清洁能源发电的分布式电源DG（Distributed Generation）逐渐应用在电力系统中。DG 一般靠近负荷，有利于提高电能质量和供电的可靠性。国内外许多专家学者认为分布式发电与集中式发电相结合是降低能耗、减轻环境污染；提高能源利用率和电力系统可靠性、灵活性的主要方式[1]。

大量DG的并网运行将改变配电网的结构，对配电网的稳定运行将造成很大冲击。文献[2]总结了DG对电能质量、继电保护、电网稳定运行等方面的影响。文献[3]对逆变型DG和旋转型DG进行了对比分析，指出DG对系统供电电压的冲击与注入功率、并入系统的短路容量及DG的功率因数有关。并提出了利用短路比和刚性率来评估分布式电源对配电网供电电压质量影响的方法。文献[4]对由于DG的不确定性以及与配网之间的相互作用而导致的电压跌落、电压闪变等问题进行了深入研究。文献[5]提出限制DG容量、提高保护动作速度以及提高无功控制能力和采用适当的控制策略是提高大容量DG接入后电网电压稳定性的重要措施。文献[6]基于链式配电网络、恒功率静态负荷模型和PQ形式的DG，得出了分布式发电在配电网中接入位置和出力等运行方式对配电网稳态电压分布的影响。

本文以提高 DG 突变后恢复稳定状态的速度和效果为出发点，采用滑模变结构控制理论设计了电力电子并网接口，对变结构模型、切换函数的确定

基金项目：三峡大学研究生科研创新基金项目（200922）

及滑模存在的条件做了深入的分析。提出利用参考电流和参考电压两项指标的综合反馈值作为系统调整的主要标准。另外，在系统中设置了一定宽度的滞环带宽，以削弱切换频率过高而带来的抖振问题。仿真结果验证了该方法的有效性和可行性。

1　含 DG 的配网简化模型

配电网的拓扑结构类型较多，鉴于对接线可靠性、保护整定方便与否、是否易于扩容等问题，国内大多数的配电系统仍以放射状链式结构为主。呈辐射状的配电网，稳态运行情况下，电压沿馈线的潮流方向逐渐降低，有功、无功负荷随时间变化会引起系统电压波动，沿线路末端方向，电压的波动越来越大。

DG的接入对配电网的供电经济性、供电可靠性、节点电压、短路电流等都会带来影响，因此对规划设计提出了新要求。其合理接入和控制方式会对电网电压的波动有所抑制，减少网络损耗。

含DG的简化配网模型如图1所示。其中S为网络电源，R为断路器，F为熔断器，L为用户负荷，并网接口采用带滑模变结构控制策略的电力电子逆变器。

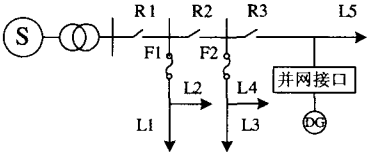

图 1　含 DG 的配网系统

Fig.1 Distributed network with DG

2　含滑模变结构控制的 DG 并网接口技术

2.1 逆变器原理及变结构模型

分布式发电并网接口方式分电力电子逆变器接口和常规旋转电机接口两类，前者在体积、变换效率、可靠性、电性能等方面均优于后者，目前 DG 并网主要采用的装置是电力电子逆变器。但是逆变器拓扑结构的设计普遍存在模块集成带来的寄生参数、成本高、体积大、逆变效率难以提高等缺点。本文引入滑模变结构控制理论，以加强对逆变器的控制，进而提高输出电压波形质量和输出功率，并消除高频化带来的开关损耗引起的效率降低问题。

滑模变结构控制器是一种用高频开关控制的状态反馈系统。在该系统中，通过对切换函数的符号判别，通过切换控制状态来改变系统结构，将受控的非线性系统的状态轨迹引向一个预先指定的状态平均空间平面上，随后系统的运动状态轨迹就限定在这个平面上。基于滑模变结构控制的逆变器原理图如图 2 所示。

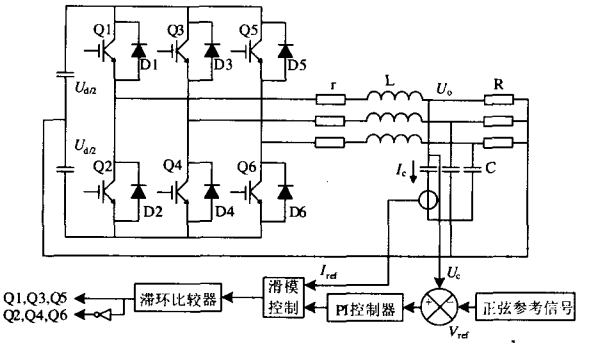

图 2　含滑模变结构控制的三相逆变器

Fig.2 Three-phase inverter with sliding mode variable structure control

图中 L 为三相滤波电感；C 为三相滤波电容；U_o 为A相输出电压；i_c 为A相电容两端电流；Q1-Q6为绝缘栅双极晶体管；D1--D6为二极管；U_d 为直流输入电压；V_{ref} 为参考电压；I_{ref} 为参考电流；R 为负载阻抗。

六只功率器件IGBT分为两组，其中Q1、Q3、Q5为一组，Q2、Q4、Q6为另一组，每组对应互补通断，输出的交流方波电压经过LC低通滤波器滤波后形成交流正弦输出电压。滑模变结构控制器的作用是将变换器输出电压尽可能准确地跟踪正弦参考信号[7]。

输出滤波器的电容电压及流过它的电流是连续可测的，故取电容电压和流过它的电流为系统的状态变量来描述系统，这样可以有效地解决滑模变结构控制器中电流基准难以测量的问题。由于系统是三相对称的，为分析方便，取其中一相得其变结构模型为[8]：

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_c \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/C \\ -1/L & -1/RC \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} u_c \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ U_d/2L \end{bmatrix} \bullet u \quad (1)$$

式中：控制信号 u 代表两组开关的通断状态。具体表达式为：

$$u = \begin{cases} 1 & Q1,Q3,Q5\text{导通} \\ -1 & Q2,Q4,Q6\text{导通} \end{cases} \quad (2)$$

当参考输出信号给定时，可以用参考信号与状态变量之差作为新的状态变量，给出新的状态变量的系统状态方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{ref}-\dot{u}_c \\ \dot{I}_{ref}-\dot{i}_c \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 & 1/C \\ -1/L & -1/RC \end{bmatrix}\bullet\begin{bmatrix} V_{ref}-u_c \\ I_{ref}-i_c \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0 \\ U_d/2L \end{bmatrix}\bullet u+\begin{bmatrix} 0 \\ \dot{I}_{ref}/C+I_{ref}/RC^2+RI_{ref}/LC \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 滑模变结构控制的切换函数确定

变结构控制系统中，当系统的状态达到某一函数值时，系统从一个结构自动转换成另一个确定的结构，这个函数即为切换函数[9]。在式（3）确定的状态空间平面上选择通过原点的斜率为负的直线作为切换线，它可以表示为系统状态变量的反馈值与其参考值之差的线性组合，即：

$$S(u_c,t)=k_1[I_{ref}(t)-i_c]+k_2[V_{ref}(t)-u_c] \quad (4)$$

式中：k_1、k_2为滑模变结构控制系数，为了使系统的状态轨迹沿切换线滑动并最终稳定于原点，取k_1、k_2均大于零。由式（4）可知，切换函数在滑模面上的动态轨迹为一阶动态过程，可解得输出电压$u_c(t)$的动态过程为：

$$u_c(t)=V_{ref}(t)+u\cdot e^{-k_1t/k_2} \quad (5)$$

由式（5）可知，工作在滑模面上的逆变器输出电压的动态过程由切换函数的系数比$\lambda=k_1/k_2$和状态轨迹到达滑模面时的初始状态共同决定，与系统的其他参数无关，这体现了系统在滑模状态时对外部扰动和内部参数变化的鲁棒性[10]。λ决定系统滑模状态时的衰减速度。λ越大意味着过度过程越短，输出电压跟踪参考电压的速度也就越快。但是λ太大，将导致滑模面区域变小甚至接近零，使滑模变结构控制难以实现滑模动态。滑模变结构系数k_1、k_2的选择必须满足滑模存在条件，即：

$$S\dot{S}<0 \quad (6)$$

满足上述滑模存在条件的变结构控制规律为：

$$u=\begin{cases} 1 & S>0 \\ -1 & S<0 \end{cases} \quad (7)$$

将式（3）、（4）、（7）代入式（6），并根据参考电流和参考电压两项指标的综合反馈值，得出滑模面区域可以由下列不等式描述：

$$\begin{cases} -\frac{1}{L}(V_{ref}-u_c)+(\lambda-\frac{1}{RC})(I_{ref}-i_c)-\frac{U_d}{2L}+K<0 \\ -\frac{1}{L}(V_{ref}-u_c)+(\lambda-\frac{1}{RC})(I_{ref}-i_c)+\frac{U_d}{2L}+K>0 \end{cases} \quad (8)$$

若切换函数的系数比λ满足上述两个不等式，则必然满足滑模存在条件[11]。为了提高逆变器效率和减少开关频率过高带来的损耗，在系统中引入一定宽度的滞环带宽，从而降低开关频率。具体控制规律为：

$$u=\begin{cases} 1 & S>+\Delta \\ -1 & S<-\Delta \end{cases} \quad (9)$$

其中的滞环宽度为2Δ，当超出该范围时，开关频率将减小，使得开关频率被控制在一定区域内，同时也有利于消除滑模变结构控制中由于切换频率过高而带来的抖动现象，进而实现输出电压对参考信号的准确跟踪。

3　仿真与实验

3.1 控制器参数

利用本文设计的滑模变结构控制器对 DG 并网时所采取的电力电子逆变电路进行仿真和实验。为了简化分析过程，采用电压源代替 DG 系统[12]。相关参数如表 1。

表 1　实验系统参数

Tab.1 Experimental system parameters

参数	数值
DG电压/V	300
参考电压/V	311sin(314t)
电容C /μF	220
电感L /mH	0.806
负载电阻/Ω	20
滞环带宽	20
开关频率/Hz	50

3.2 仿真结果

由于分布式发电系统易于受到自然界实时条件的影响，其输出电压也会随之波动，这将对电网造成扰动，影响电网的电能质量甚至会使系统解列。在仿真过程中，设置 DG 电压在 0.1 s 到 0.2 s 之间从 300 V 突变为 280 V，图 3 为滑模变结构控制系统输入的参考电压波形。图 4 为系统在受到设置的电压突变后电容两端电压与参考电压的对比波形。图 5 为输出电压经电力电子逆变系统调整后和参考电压对比波形。由图可见，该方法能使被控信号快速准确地跟踪标准参考信号，具有动态特性好、鲁棒性高等特点。能够有效地缩短系统的响应时间，弥补了由于系统非线性造成的控制不确定性。

工作在滑模面上的逆变输出电压的动态过程只与切换函数系数比和电压动态轨迹到达滑模面的初始状态有关，根据初始状态通过对控制参数的合理选择将系统状态变换量与参考电流和参考电压两项

指标的综合反馈值之差的线性组合来调整逆变系统，以减轻输出电压的波动。

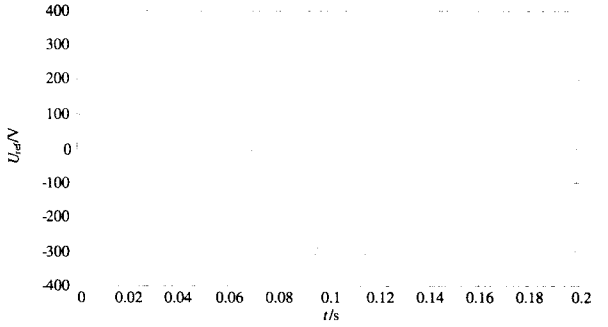

图 3 参考电压波形

Fig.3 Reference voltage waveform

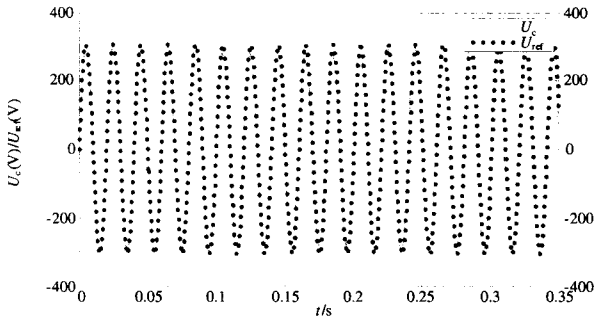

图 4 电容两端电压和参考电压对比波形

Fig.4 Comparison between U_c and V_{ref} waveform

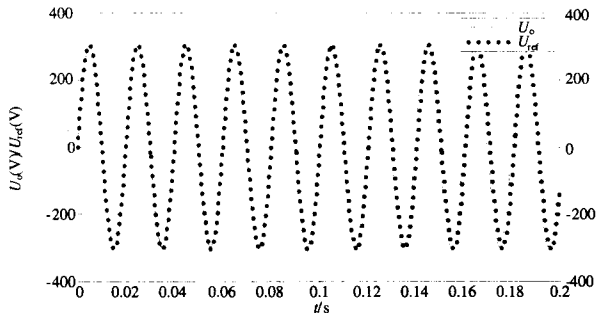

图 5 输出电压和参考电压对比波形

Fig.5 Comparison between U_o and V_{ref} waveform

4 结论

本文对含分布式电源的配电网模型进行了分析，研究了分布式电源在滑模变结构控制作用下的并网接口。针对并网接口拓扑结构复杂、寄生参数多、逆变效率难以提高等缺点，设置了一定宽度的滞环带宽来消除滑模变结构控制中由于切换频率过高而带来的抖振问题。实验和仿真结果表明：切换函数的系数比决定系统是否能够到达滑模条件以及滑模状态时的衰减速度。该方法实现简单，减少了逆变系统中的开关损耗，使输出波形能够更好地跟踪参考电压波形；提高了 DG 电压突变后恢复稳定状态的速度和效果，能够使电网可靠稳定地运行，具有较强的工程应用价值。

参考文献

[1] 李峰，李兴源，郝巍．不间断电力变电站中分布式电源接入系统研究[J]．继电器．2007,35(10):13-18.
LI Feng，LI Xing-yuan，HAO Wei．A Research of the Distributed Generation in the Uninterrupted Power Substation Connected to the Grid[J]. Relay,2007,35(10): 13-18.

[2] 莫颖涛．影响我国分布式发电发展的关键因素[J]．电网技术,2008,32(1):176-178.
MO Ying-tao．The Pivotal Effecting Factors in the Development of Distributed Generation in China[J]. Power System Technology，2008,32(1):176- 178.

[3] 裴玮，盛鹏，孔力，等．分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J]．中国电机工程学报，2008,28(13):152-157.
PEI Wei，SHENG Kun，KONG Li，et al．Impact and Improvement of Distributed Generation on Distribution Network Voltage Quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2008,28(13):152-157.

[4] Giuseppe E，Dario Z，George C. L，et al．Impact of Embedded Generation on the Voltage Quality of Distribution Networks[A].in:9th International Conference: Electrical Power Quality and Utilization[C]. Barcelona: 2007.

[5] 林莉，孙才新，王永平，等．大容量风电场接入后电网电压稳定性的计算分析与控制策略[J]．电网技术．2008,32(3):41-46.
LIN Li，SUN Cai-xin，WANG Yong-ping，et al. Calculation Analysis and Control Strategy for Voltage Stability of Power Grid with Large Capacity Wind Farm Interconnected[J].Power System Technology, 2008,32(3): 41-46.

[6] 王志群，朱守真，周双喜,等．分布式发电对配电网电压分布的影响[J]．电力系统自动化．2004,28(16):56-60.
WANG Zhi-qun，ZHU Shou-zhen，ZHOU Shuang-xi，et al．Impacts of Distributed Generation on Distribution System Voltage Profile [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(16):56-60.

[7] 唐朝阳，黄石生，王振民，等．基于自适应滑模控制的燃料电池电站输出波形控制策略[J]．电网技术,2008,32(12):75-78.
TANG Chao-yang，HUANG Shi-sheng，WANG Zhen-min，et al．Control Strategy in Output Waveform Adjustment of Power Conditioning System for Fuel Cell Power Plant based on Adaptive Siding Mode Control[J].Power System Technology,2008,32(12): 75-78.

（下转第82页　continued on page 82）

形，暂态情况下对非周期分量和高次谐波的传变尽量保持不失真。

2.7 系统故障诊断和机组内部短路分析模块

由于大型发电机组运行工况及机电和电磁特性复杂，发电机绕组内部故障属于内部电气不对称故障，主要有解析计算法、试验研究法和数字仿真法等。解析计算法形式简洁，计算工作量小，但对模型做了很大的简化和近似，在此基础上得到的分析结果会有较大的误差。试验研究法通过动模机组进行故障的动态模拟试验研究，代价较高，周期较长，并且难以模拟全部的故障，无法代表真正的工业机组，可以作为理论研究的一种有益补充。数字仿真法利用计算机作为工具对实际系统的数学模型进行求解分析，经济安全灵活方便，近年来发展很快，其关键在于数学模型的建立。目前，基于多回路分析法，在全面的内部故障仿真计算的基础上进行量化分析，目前已得到了一定的工程应用。

在监录系统中，结合录波装置的现场试验数据和故障数据，采用多回路分析法，可以较为准确地获得绕组故障后的内部电磁关系和绕组电流分布，从而调整优化仿真数学模型，使之更加符合实际机组，在内部故障仿真计算的基础上，为进一步验证和优化发电机主保护配置方案提供帮助。同时，根据录波数据结合保护上使用的一些故障判据，分析判断出是何种系统故障或短路故障，故障点在发电机内部还是在变压器内部，故障分析能定位到确定的相或确定的设备上。

2.8 机组试验模块

在监录系统中，结合现场大机组试验要求，开发针对发电机、变压器、励磁系统等的试验记录和分析模块，为现场机组投运提供方便，提高工作效率。

3 结论

随着 DL/T873-2004《微机型发电机变压器组动态记录装置技术条件》新标准的建立，录波装置的国家标准也在积极制定中，同时，国家电网公司也发文要求 200 MW 及以上容量发电机变压器组应配置专用故障录波装置。因此，大型机组尤其是 1 000 MW 大型机组装设监录系统已经成为共识。目前，我公司正积极致力于数字式 1 000 MW 大型机组监视录波分析诊断系统的研制，随着新一代机组监录装置的推出，必将以其卓越的性能赢得用户的广泛好评，占有更大的市场份额，国内外大量发电机组都有可能直接得益于该装置的优良性能。

参考文献

[1] DL/T873-2004，微机型发电机变压器组动态记录装置技术条件[S].

[2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京：中国电力出版社，1996.

收稿日期：2008-09-16；　修回日期：2008-10-07

作者简介：

丁俊健（1976-），男，工学硕士，工程师，主要从事电力系统继电保护和录波装置的研究与开发工作；E-mail: ly-djj@sac-china.com

（上接第 78 页　continued from page 78）

[8] 张黎，丘水生. 滑模控制逆变器的分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006,26(3):59-63.
ZHANG Li, QIU Shui-sheng. Analysis and Experimental Study of Sliding Mode Control Inverter[J].Proceedings of the CSEE,2006,26(3):59-63.

[9] Utkin V I.Variable Structure Systems with Sliding Modes[J]. IEEE Trans on Automatic Control,1977,22(2): 212-222.

[10] Jezernik K，Zadravec D. Sliding Mode Controller for a Single Phase Inverter[A]. in: Proceeding of APEC' 90[C]. Los Angeles:1990.

[11] 刘金坤. 滑模变结构控制MATLAB仿真[M]北京：清华大学出版社，2005.
LIU Jin-kun. MATLAB Simulation for Sliding Mode Control[M].Beijing: Tsinghua University Press,2005.

[12] Calais M, Myrzik J, Spooner T, Et al. Inverters for Single-phase Grid Connected Photovoltaic Systems-an Review[A]. in: IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference[C].Australia:2002.

收稿日期：2009-01-20；　修回日期：2009-02-25

作者简介：

黄悦华（1972-），男，副教授，主要从事电机及其控制、计算机应用、电网运行、调试及检测技术等方面的教学与研究；

朱　杰（1983-），男，硕士研究生，主要从事分布式条件下电力系统保护与控制、电网运行、电力电子等方面的研究。E-mail:riso0513@163.com