# 基于新能源逆变系统的直流侧电磁干扰噪声机理 分析及其抑制技术

孙红艳<sup>1</sup>,刘 勇<sup>2</sup>,赵 阳<sup>2</sup>,张宇环<sup>2</sup>,颜 伟<sup>2</sup>
(1.南京师范大学 泰州学院,江苏 泰州 225300;
2.南京师范大学 电气与自动化工程学院,江苏 南京 210042)

摘要:针对新能源逆变系统的直流侧传导电磁干扰(EMI)噪声进行了综合分析,就其产生机理提出了直流 侧传导电磁干扰噪声的共模干扰机理模型和差模干扰机理模型,在共模、差模噪声分析的理论基础上,详 细分析了直流 EMI 滤波器的设计及其特性。采用 MATLAB 仿真对比分析了高频寄生参数的存在对 DC\_LISN 受试端阻抗、隔离度、插入损耗等参数的影响。以某一风能逆变系统为实验对象,具体分析了该系 统直流侧的传导干扰噪声特性,并设计了相应的直流 EMI 滤波器。实验结果很好地验证了采用所提方法设 计的直流 EMI 滤波器的有效性。

关键词:新能源逆变; 直流; 传导电磁干扰; MATLAB; 仿真; 高频寄生参数; 滤波器; 噪声 中图分类号: TM 464; TM 937.4 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.012

# 0 引言

随着环境污染的加大及传统能源的日益紧缺, 改善能源结构与发展可再生新能源,提高电能的质 量已经成为我国能源发展的战略性措施。近年来随 着电力电子技术的进步以及国家相关政策的扶持, 新能源变换技术得到广泛应用,然而变换技术中大 量使用电力电子器件,导致变换系统的电磁兼容性 问题日益凸显<sup>[1-4]</sup>。当下,针对新能源逆变系统交流 侧的电磁干扰 EMI(ElectroMagnetic Interference)分 析与抑制已取得了较大进展,较多采用噪声分离网 络进行噪声模态分离,包括共模/差模<sup>[58]</sup>,而就交流 侧干扰噪声抑制提出了解耦电容、X 电容、Y 电容、 共模扼流圈、铁氧体磁环、EMI 滤波器等有效措施滤 除线缆高频(150 kHz~30 MHz)噪声<sup>[9-15]</sup>。

尽管如此,上述方法主要针对逆变系统的交流 侧 EMI 噪声进行了机理特性分析,而直流 EMI 噪声 和交流 EMI 噪声在生成机理上存在一定差别,因而 上述抑制措施在直流 EMI 噪声的抑制方面也存在 较大欠缺<sup>[1647]</sup>。此外,直流侧 EMI 噪声测量需要采用 人工电源网络,然而人工电源网络的性能好坏直接 影响 EMI 噪声的提取精度,同时影响 EMI 噪声生 成机理特性的分析。但是,针对直流人工电源网络 (DC\_LISN)特性分析和校准特性的研究甚为少见。

#### 收稿日期:2012-08-17;修回日期:2013-07-19

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK2011789);江苏 省教育厅高校科研成果产业化推进项目(JHB2011-20);江苏省 研究生培养创新工程资助项目(CXZZ12\_0404,CXLX12\_0411) Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK2011789),Education Department of Jiangsu Province University Research Industry Promotion Project (JHB2011-20) and Jiangsu Province Graduate Education Innovation Project (CXZZ12\_0404,CXLX12\_0411) 鉴于此,在前期研究基础上,本文分析了新能源 逆变系统直流侧 EMI 噪声产生机理,对 DC\_LISN 进 行了理论分析并提出了其插入损耗、阻抗等特性参 数,有效分析了直流 EMI 滤波器的设计,通过搭建实 验系统较好地验证了新能源逆变系统直流侧噪声诊 断方法的有效性。

# 1 逆变系统直流侧 EMI 噪声机理分析

为深入分析新能源逆变系统的传导 EMI 噪声 机理,建立了如图 1 所示的新能源电能变换系统的 电磁兼容平台结构图,该平台包括新能源模块、DC/ DC 升压系统、DC\_LISN、DC/AC 逆变系统、噪声分离 网络、频谱仪等。





传导 EMI 噪声包括火线-地线、中线-地线间高 频噪声电流引起的共模噪声 U<sub>CM</sub> 以及火线-中线间 高频噪声电流引起的差模噪声 U<sub>DM</sub>。在新能源逆变系 统中,逆变器的高频化、较大的 du/dt 和 di/dt、电 路的杂散电感和电容、控制策略和电路拓扑等都是 产生传导 EMI 的主要原因。

### 1.1 逆变系统直流侧的共模干扰

图 2 为典型单相全桥逆变电路,其中 C<sub>d</sub> 为稳压 电容,Z<sub>1</sub>、Z<sub>2</sub> 均为负载阻抗。当逆变电路工作在高频 状态下时,开关管的电压、电流突变非常快,可达



图 2 考虑直流侧高频寄生电容的共模干扰电流流通路径 Fig.2 Path of common-mode interference current considering DC-side high-frequency parasitic capacitance

kV/μs,该突变电压、电流即 du/dt、di/dt 通过直流 母线正负极对参考地寄生电容的耦合而形成共模干 扰,电源直流母线正(L<sub>1</sub>)、负(L<sub>2</sub>)线对参考地存在高 频寄生电容分别为 ESC<sub>1</sub>、ESC<sub>2</sub>,这样 L<sub>1</sub>上流过的高 频电流成分  $I_{CM1}$  会通过 ESC<sub>1</sub>流入参考地,而 L<sub>2</sub>上流 过的高频电流成分  $I_{CM2}$  则通过 ESC<sub>2</sub>流入参考地,根 据传导 EMI 噪声共模噪声分类的定义,得逆变系统 直流侧的共模干扰电流大小  $I_{CM}$  为:

$$I_{\rm CM} = (I_{\rm CM1} + I_{\rm CM2})/2 \tag{1}$$

根据图 2 所示共模干扰产生的路径,考虑高频寄生电容参数,可以提取出逆变系统直流侧的共模干扰等效电路模型如图 3 所示。图中,*L<sub>p</sub>、R<sub>p</sub>*分别为提取等效电路的等效感抗和等效阻抗。



图 3 直流侧共模干扰等效电路模型

Fig.3 Equivalent circuit model of DC-side common-mode interference

### 1.2 逆变系统直流侧的差模干扰

逆变器输入端的差模干扰主要是由于逆变器的 输入电流是一个脉动的电流信号。虽然在输入端会 有一个大的电解电容来滤除其谐波分量,但电解电 容具有较大的高频等效电感和电阻,不可能完全滤 除这些谐波电流。同样,与共模干扰噪声产生机理 相似,逆变电路工作状态下的高突变电压、电流在直 流母线正负极线上流过产生高频电流,从而产生差 模干扰电流 *I*<sub>DM</sub>,如图 4 所示,对应的差模干扰等效 电路模型如图 5 所示,其中 *Z*<sub>s</sub> 为差模干扰电路等效 阻抗,*U*<sub>s</sub> 为等效差模干扰源。差模干扰电流大小为:

$$I_{\rm DM} = I_{\rm CM1} - I_{\rm CM2} \tag{2}$$

# 1.3 直流电源 EMI 滤波器

根据逆变系统直流侧干扰噪声机理分析,可得 直流侧干扰噪声与传统意义上的交流干扰噪声非常 类似,即包括共模噪声和差模噪声2种模态。由于 EMI 滤波器是抑制传输线干扰噪声最有效的措施之 一,因而如何提高滤波器的抑制性能对于干扰噪声



图 4 考虑直流侧高频寄生电容的差模干扰电流流通路径 Fig.4 Path of differential-mode interference current considering DC-side high-frequency

parasitic capacitance



图 5 直流侧差模干扰等效电路模型

Fig.5 Equivalent circuit model of DC-side differential-mode interference

的抑制具有非常重要的意义。

图 6 为常用的逆变器直流输入 EMI 滤波电路, 其中 U<sub>2</sub> 为逆变电路输入电压;U<sub>1</sub> 为直流侧电源输出 电压;Z<sub>0</sub> 为从逆变电路输入侧得到的等效阻抗,并在 此假设等效阻抗为纯电阻 R。



图 6 逆变器直流输入滤波器电路与等效电路 Fig.6 Input filter at DC side of inverter and its equivalent circuit

滤波器的传递函数(采用拉氏变换)为:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{R/(sC_{\rm in})}{R+1/(sC_{\rm in})}}{sL_{\rm in} + \frac{R/(sC_{\rm in})}{R+1/(sC_{\rm in})}}$$
(3)

滤波器的谐振角频率为 $\omega_0=1/\sqrt{L_{in}C_{in}}$ ,阻尼系

数为 
$$\delta = \frac{\omega_0 L_{in}}{2R} = \frac{L_{in}}{2R\sqrt{L_{in}C_{in}}} = \frac{\sqrt{L_{in}/C_{in}}}{2R} \circ$$
  
将  $S = j\omega$  代入式(3)可得滤波器的频率响应特性:  
$$\frac{U_2}{U_1}(j\omega) = \frac{1}{-\frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j2\delta\frac{\omega}{\omega_0} + 1}$$
(4)

用相对频率 v 表示  $\omega/\omega_0$ ,式(4)可表示为:

$$\frac{U_2}{U_1}(j\omega) = \frac{1}{-v^2 + j2\delta v + 1}$$
(5)

其中, $v = \omega / \omega_0 = \omega \sqrt{L_{in} C_{in}}$ 

根据式(5)可得如图 7 所示的 δ 分别为 0、0.5、1 情况下的 EMI 滤波器幅频特性曲线。

定量分析 EMI 滤波器的滤波器特性,假定在等效 阻抗等于直流 EMI 滤波器的特征阻抗、 $\delta = 0.5$  情况 下,滤波器特性如表 1 所示。



图 7 直流 EMI 滤波器在  $\delta$ =0,0.5,1 下的幅频特性曲线 Fig.7 Amplitude-frequency characteristic curves of DC EMI filter for  $\delta$  is 0,0.5 or 1

表 1  $Z_0$ 等于滤波器特征阻抗、 $\delta=0.5$ 时的滤波器特性 Tab.1 Characteristics of filter when  $Z_0$  is equal to its characteristic impedance and  $\delta$  is 0.5

v	$\omega 与 \omega_0 关系$	$U_2 / U_1$	$20\log(U_2/U_1)$	滤波状态
= 1	$\omega = \omega_0$	= 1	=0	畅通
<1	$\omega < \omega_0$	<1	>0	升值
>1	$\omega > \omega_0$	>1	<0	衰减

# 2 DC\_LISN 理论分析

线阻抗稳定网络LISN(Line Impedance Stabilization Network),即V型人工电源网络,是目前国际上 规定的传导EMI测量设备,又被称作人工电源网络 或电源阻抗稳定网络,是重要的电磁兼容测试设 备。其主要作用就是在射频范围内向受试设备端子 之间提供一规定阻抗,并能将试验电路与供电电源 上的无用射频信号隔离开,进而将骚扰电压耦合到 测量接收机上,是噪声分离技术研究的基础。

图 8 为最常用的 50  $\Omega/5 \mu$ H+1  $\Omega$ -V 型直流人 工电源网络(其测试频段为 150 kHz~100 MHz)的结 构图,其中  $L_0=5 \mu$ H, $C_1=2 \mu$ F, $C_2=0.1 \mu$ F, $R_1=1 \Omega$ ,  $R_2=1000 \Omega$ , $R_3=50 \Omega$ , $R_4=50 \Omega$ (接收机内阻抗)。无 源器件如电容、电感、电阻在低频状态时呈现本征特 性,但是随着频率的增大,由于制作工艺、材料、环境 等因素的存在,必然会伴随着微小的寄生参数产生, 且频率越高,寄生参数影响越大。在高频下电感呈容 性,电容呈感性,由于电阻的高频特性暂不能确定, 且影响相对电感、电容小,考虑寄生参数影响时可以 忽略电阻的高频寄生参数影响。根据上述分析,可以 得到考虑器件寄生参数影响的 DC\_LISN 等效电路 如图 9 所示。

GB/T6113.102—2008 标准中对 DC\_LISN 的阻抗有严格规定,在 150 kHz~30 MHz 频段内的阻抗必须满足标准规定范围,当阻抗不满足规定范围时会导



图 8 50  $\Omega/5 \mu$ H+1  $\Omega$ -V 型人工电源网络的结构图 Fig.8 Structure of 50  $\Omega/5 \mu$ H+1  $\Omega$ -V type AMN



图 9 考虑寄生参数影响的等效电路图 Fig.9 Equivalent circuit considering influence of parasitic parameter

致测量精度不高,甚至无法保证测量结果的准确性。

DC\_LISN 的阻抗包括当骚扰输出端端接 50 Ω 负载阻抗时在受试设备端测得的相对于参考地的阻 抗的模和相角 2 个部分,即当接收机端接 50 Ω 负载 阻抗时,被测设备端口的端子与参考地之间的阻抗, 包括模和相角,称为受试端阻抗。

根据图 8 的等效电路图,为综合考虑各种情况 下的受试端阻抗,对其进行 MATLAB 仿真,可得电 路中电感的寄生电容、电容的寄生电感以及适配器 的寄生电感对 DC\_LISN 的受试端阻抗影响较大,因 此采用寄生参数小或者采取一定措施减少元器件的 寄生参数对于 DC\_LISN 性能的提高具有很大意义。

DC\_LISN 的隔离度(IRRLL)可以有效评估电源 侧无用信号和未知阻抗对测量结果的影响,即射频 输出信号受到供电电源端子信号影响的程度:

$$\text{IRRLL} = 20 \log \left| \frac{V_{\text{If-E}}}{V_{\text{L-E}}} \right| \tag{6}$$

其中, $V_{\text{II-E}}$ 为射频输出信号, $V_{\text{LE}}$ 为供电电源端子端 信号。考虑不同元器件的寄生参数对隔离度特性的 影响,采用 MATLAB 仿真不同寄生参数影响,经过 仿真分析, $L_0$ 的寄生参数对隔离度影响很大,考虑 $L_0$ 寄生电容时,低频段隔离度效果变好,达到谐振点 后,隔离度随频率增大效果变差,且寄生电容大时先 达到谐振,影响明显。

考察 DC\_LISN 的另一个特性参数是插入损耗,通 过计算 DC\_LISN 的插入损耗大小,可以非常直观地 判断其性能的好坏,更能确定其测量精度。插入损耗 即为受试端口至射频输出端口这一路径的高频衰减:

$$\text{VIFL}=20\log\left|\frac{V_{\text{If}-\text{E}}}{V_{\text{I'}-\text{E}}}\right| \tag{7}$$

其中,V<sub>L'-E</sub>为受试端信号,且 VIFL≤1,插入损耗越 小则表明受试端口至射频输出端口的路径高频衰减 越大,即测试得到的噪声信号与实际噪声信号大小 偏差越大。同样根据图9的考虑寄生参数的等效电 路,对其进行 MATLAB 仿真可以得到寄生参数大小 不同情况下的插入损耗特性,仿真结果显示电容 C<sub>2</sub>寄 生电感在高频段对分压系数影响比较大,且寄生参数 越大,影响越明显。适配器寄生参数在高频段时,分 压效果差,且寄生参数越大,影响越明显。但常规标 准规定的传导 EMI 噪声测试频段为 150 kHz~30 MHz,而在该频段内,DC\_LISN 的插入损耗受寄生参 数影响较小。

综述理论与仿真分析可得,在常规传导干扰测试频段(150 kHz~30 MHz), DC\_LISN 的受试端阻抗与隔离度受元器件自身的寄生参数影响较大, 而插入损耗基本不受其影响, 因此在考虑 DC\_LISN 校准与测量精度的提高时, 应主要关注降低无源器件寄生参数对于受试端阻抗与隔离度的影响。

# 3 实验设计与结果分析

以风力发电的逆变系统为例,分析新能源逆变系统的直流侧传导 EMI 噪声,实验系统由风力发电机、 DC\_LISN、逆变器(包括负载)、接收机和噪声分离网 络等模块构成。其中风力发电机为通过外界风力吹 动工作而产生直流 48 V;DC\_LISN 采用苏州泰思特公 司的 LSI-5 μH-100,频率范围为 0.1~150 MHz;逆变器 采用风光发电专用逆变器;接收机采用固伟的 GSP-827,频率范围为 9 kHz~2.7 GHz;噪声分离网络的信 号损耗在频率范围内最大为 2 dB,共模/差模抑制比 最小为 35 dB,输入阻抗为 50 Ω。

当风力发电机正常工作,逆变器输出端接满载负载,且未在直流侧接入 EMI 滤波器时,通过 DC\_LISN 测得的直流母线正、负极干扰噪声大小如图 10 所示。根据测试结果可得,该逆变系统的双线传导电磁干扰噪声均超过国家标准限值,需要采用有效的抑制措施对其进行抑制,即设计直流 EMI 滤波器。



图 10 直流母线正、负极传导干扰噪声测试结果 Fig.10 Conducted EMI noise tested on positive and negative poles of DC bus

考虑到设计直流 EMI 滤波器,由于 DC\_LISN 只能提取干扰噪声中的总噪声,而无法进行模态噪声的提取,故需要采用噪声分离网络对直流侧总噪声中的共模、差模噪声模态进行提取,从而判断逆变系

统直流侧传导干扰噪声中不同模态噪声的比重,从 而设计相应模态的 EMI 滤波器。噪声模态提取结果 如图 11 所示。



Fig.11 Test results of noise mode extraction

根据噪声分离网络的模态分离结果可知共模噪声是该系统直流侧传导 EMI 噪声中的主要成分,而差模噪声信号较小,因而只需要设计共模 EMI 滤波器。参考 1.3 节中的直流 EMI 滤波器设计原理及其性能指标,设计结构如图 12 所示的共模 EMI 滤波器。将设计的滤波器接入逆变系统的直流侧,再次测量其直流侧传导 EMI 噪声,结果如图 13 所示,整个传导测试频段内逆变系统的传导干扰噪声均在限值下,该结果较好地验证了所设计的共模 EMI 滤波器在抑制直流干扰噪声方面的有效性。



# 4 结论

本文在新能源逆变系统直流侧传导 EMI 噪声 机理分析的基础上提出了其共模干扰等效模型和差 模干扰等效模型,分析直流 EMI 滤波器的特性及其 设计方法。同时提出了直流传导干扰噪声测试设备 DC\_LISN 的高频寄生参数模型,采用 MATLAB 仿真 具体分析了不同寄生参数对于其特性参数的影响, 对于提高 DC\_LISN 的测试精度具有一定的理论价 值。为验证本文研究方法的有效性,以某一风能逆变 系统为实验对象,测量并分析了该系统的传导 EMI 噪声楣况,测试结果表明该系统的直流侧传导 EMI 噪声超过了 GB9254B 标准,为了使其达到标准,采用 本文设计方法设计了直流 EMI 滤波器,实验结果很好 地证明了抑制方法的有效性。本文的研究内容对于 新能源逆变系统的传导 EMI 抑制技术研究具有一 定的理论参考价值。

# 参考文献:

- PAUL C R. Introduction to electromagnetic compatibility [M].
   2nd Ed. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2006:326-343.
- [2] 孟进,马伟明,张磊,等. PWM 变频驱动系统传导干扰的高频模型[J]. 中国电机工程学报,2008,28(15):141-146.
   MENG Jin,MA Weiming,ZHANG Lei,et al. High frequency model of conducted EMI for PWM variable-speed drive systems
   [J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(15):141-146.
- [3] AKAGI H, SHIMIZU T. Attenuation of conducted EMI emissions from an inverter-driven motor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(1):282-290.
- [4] REDOUTE J M, WALRAVENS C, van WINCKEL S, et al. An externally trimmed integrated DC current regulator insensitive to conducted EMI[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(1):63-70.
- [5] 孙亚秀,孙力,姜保军,等. 低成本高性能的共模和差模噪声分离 技术[J]. 中国电机工程学报,2007,27(16):98-103. SUN Yaxiu,SUN Li,JIANG Baojun, et al. Common and differential mode noise separate technology with low cost and high performance[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(16):98-103.
- [6] NAVE M J. A novel differential mode rejection network for conducted emissions diagnostics [C] // IEEE 1989 National Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1989. Denver, USA: IEEE, 1989:223-227.
- [7] SEE K Y. Network for conducted EMI diagnosis[J]. Electronics Letters, 2002, 35(17):1446-1447.
- [8] MARDIGUIAN M,RAIMBOURG J. An alternate, complementary method for characterizing EMI filters[C]//1999 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Seattle, USA: IEEE, 1999:882-886.
- [9]张亚玉,苏建徽,王其兵.大功率电流源型变频器共模电压研究
   [J].电力自动化设备,2011,31(10):85-88.
   ZHANG Yayu,SU Jianhui,WANG Qibing. Study of common-

ZHANG Yayu, SU Jianhui, WANG Qibing. Study of commonmode voltage in high-power current source converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10):85-88.

[10] 胡雪峰,王璐,龚春英,等. 可再生能源并网发电馈网电流中的 谐波分析及其抑制策略[J]. 中国电机工程学报,2010,30(增刊 1):167-170.

HU Xuefeng, WANG Lu, CONG Chunying, et al. Harmonic analysis and suppression strategies of grid current for renewable energy grid integration system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(Supplement 1):167-170.

- [11] 邱燕,肖岚,曹海港. 基于噪声仿真的 EMI 滤波器研究[J]. 电力自动化设备,2010,30(9):96-100.
  QIU Yan,XIAO Lan,CAO Haigang. EMI filter design based on noise simulation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010,30(9):96-100.
- [12] KOYAMA Y,TANAKA M,AKAGI H. Modeling and analysis for simulation of common-mode noises produced by an inverterdriven air conditioner[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(5):2166-2174.
- [13] 赵阳,SEE K Y. 电磁兼容基础与应用[M]. 英文版. 北京:机械 工业出版社,2006;68-78.
- [14] 赵阳,董颖华,陆婋泉,等. EMI 噪声分离网络在电力线噪声分析中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(21):114-120.
  ZHAO Yang,DONG Yinghua,LU Xiaoquan,et al. EMI noise discrimination network applied to power-line EMI noise analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(21):114-120.
- [15] 赵阳,董颖华,陆婋泉,等.大功率开关磁阻电机 EMI 噪声综合 分析与处理[J].中国电机工程学报,2011,31(21):135-141.
  ZHAO Yang,DONG Yinghua,LU Xiaoquan,et al. EMI noise analysis and process for large-power switched reluctance motor [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(21):135-141.
- [16] di PIAZZA M C,SERPORTA C,TINE G,et al. Electromagnetic compatibility characterisation of the DC side in a low power photovoltaic plant[C]//2004 IEEE International Conference on Industrial Technology,ICIT 2004. Hammamet,Tunisia;IEEE,2004: 672-677.
- [17] KONG Pengju, JIANG Yan, LEE F C. Common mode EMI noise characteristics of low-power AC-DC converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2):731-738.
- [18] HAMZA D, JAIN P K. Conducted EMI in grid-tied PV system [C] // 32nd International Telecommunications Energy Conference. Orlando, FL, USA: [s.n.], 2010:1-7.
- [19] MENG Jin, MA Weiming. A new technique for modeling and analysis of mixed-mode conducted EMI noise[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004,19(6):1679-1687.
- [20] XING Lei, SUN Jian. Conducted common-mode EMI reduction by impedance balancing[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3):1084-1089.

作者简介:

孙红艳(1980-), 女, 江苏泰州人, 讲师, 硕士, 从事电力 电子与电磁兼容技术研究(E-mail:601848884@qq.com);

赵 阳(1966-), 男, 江苏南京人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电气工程、电磁兼容。

(下转第80页 continued on page 80)

法[J]. 电路与系统学报,2005,10(1):58-63.

LI Weiwu, WANG Hui, ZOU Zhijun, et al. Function optimization method based on bacterial colony chemolaxis[J]. Journal of Ciccuits and System, 2005, 10(1):58-63.

[19] MÜLLER S D, MARCHETTO J, AIRAGHI S, et al. Optimization based on bacterial chemotaxis[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1):16-28.

#### 作者简介:

付红军(1968-),男,河南开封人,高级工程师,硕士,研究 方向为电力系统运行、分析与控制:

潘励哲(1989-),男,湖南常德人,硕士,研究方向为电力 系统运行与控制:

林 涛(1969-),男,浙江温州人,教授,博士研究生导师,

博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统继电保护、新能源发电与智能电网、电能质量分析与控制(E-mail: tlin@whu.edu.cn);

孙建华(1976-),男,河南驻马店人,高级工程师,硕士,研 究方向为电力系统运行、分析与控制:

余光正(1987-),男,湖北宜昌人,博士研究生,研究方向 为电力系统运行与控制:

李志恒(1983-),男,河南漯河人,工程师,硕士,研究方向 为电力系统运行、分析与控制:

张健南(1989-),男,河南驻马店人,硕士研究生,研究方 向为电力系统运行与控制:

孙 冉(1980-),女,河南商丘人,高级工程师,硕士,研究 方向为电力系统运行、分析与控制。

# Coordinative optimization of PSS and DC-modulation based on improved PGSA

FU Hongjun<sup>1</sup>, PAN Lizhe<sup>2</sup>, LIN Tao<sup>2</sup>, SUN Jianhua<sup>1</sup>, YU Guangzheng<sup>2</sup>,

LI Zhiheng<sup>1</sup>, ZHANG Jiannan<sup>2</sup>, SUN Ran<sup>1</sup>

(1. Henan Electric Power Dispatching Center, Zhengzhou 450052, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract**: An optimization strategy to coordinate the supplementary damping controller in DC-modulation and the PSS(Power System Stabilizer) of AC/DC system is researched for improving its small signal stability and an improved PGSA(Plant Growth Simulation Algorithm) is proposed to solve it. The search efficiency and convergence rate of the proposed algorithm are enhanced by improving the search step and integrating the cloud model theory into iteration to find new growth points. With the least damping ratio of electromechanical oscillation mode under different operating conditions as the objective, eigenvalue analysis and time-domain simulation are carried out for a modified four-generator two-area system as an example, and results show that the improved PGSA damps low frequency oscillation and enhances system small signal stability effectively. **Key words**; DC-modulation; PSS; PGSA; electric power systems; stability; coordinative optimization

(上接第 68 页 continued from page 68)

# Analysis and suppression of electromagnetic interference noise at DC side of new energy inverter system

SUN Hongyan<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>2</sup>, ZHAO Yang<sup>2</sup>, ZHANG Yuhuan<sup>2</sup>, YAN Wei<sup>2</sup>

(1. Taizhou College, Nanjing Normal University, Taizhou 225300, China;

2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract**: The conducted EMI(ElectroMagnetic Interference) noise at the DC side of new energy inverter system is comprehensively analyzed and its common-mode and differential-mode interference models are proposed based on its generation mechanism. The design of DC EMI filter and its characteristics are analyzed in detail. MATALB simulation is adopted to analyze the influence of high-frequency parasitic parameters on the EUT port impedance, isolation and insertion loss of DC\_LISN. As an experiment, the characteristics of DC-side conducted EMI noise is analyzed for a wind inverter system and a corresponding DC EMI filter is designed to suppress its excessive EMI noise. Experimental results show the effectiveness of the designed DC EMI filter.

Key words: new energy inverter; DC; conducted EMI; MATALB; computer simulation; high-frequency parasitic parameter; electric filters; noise

80