电网电压波动时双馈电机无功补偿的性能研究

布天文，任东红，许西平，刘亚婷

（国网陕西省电力公司商洛供电公司，陕西 商洛 726000）

摘要：电网电压上下波动会对双馈电机输出产生一定的影响，需要进行无功补偿稳定电网。为了实现电网电压的准确补偿，保证电网电压稳定，需要对电网电压波动时双馈电机的输出有功、无功功率进行分析，求出电纳值，利用有源滤波器（APF）进行谐波检测，去除无功补偿器（SVC）中固定电容分量，进行电网电压反馈控制与电网负载谐波的补偿控制，实现对电压波动时双馈电机的无功补偿。实验结果表明，该方案具有一定的可行性，在电网电压波动时，双馈电机能够提供所需的无功补偿，且补偿效果较好，具有较高的稳定性。

关键词：电网电压；双馈电机；无功率补偿；反馈控制；前馈控制

Analysis of reactive power compensation characteristics of doubly-fed machines with grid voltage fluctuation

BU Tianwen, REN Donghong, XU Xiping, LIU Yating

(State Grid Shanxi Electric Power Company Shangluo Power Supply Company, Shangluo 726000, China)

Abstract: The fluctuation of power grid voltage will have a certain effect on the output of doubly-fed machine, so reactive power compensation is needed to stabilize the power grid. In order to accurately compensate the voltage of the power network and ensure the stability of the voltage, it is necessary to analyze the output active and reactive power of the doubly-fed machine when the voltage is fluctuating, to find out the value of the susceptance, and to detect the harmonics by using the active power filter (APF). The fixed capacitance component is removed from the reactive power compensator (SVC) and the voltage feedback control and the load harmonic compensation control are carried out to realize the reactive power compensation for the doubly-fed machine when the voltage fluctuates. The experimental results show that this scheme is feasible in power grid voltage. When fluctuating, the doubly-fed machine can provide the required reactive power, and the compensation effect is better, and it has higher stability.

Key words: grid voltage; doubly-fed machine; no power compensation; feedback control; feedforward control

0 引言

随着现代电力技术的不断发展，风电场输出功率的稳定性也越来越重要，如今变速恒频电机在风电场中受到较大的重视[1-2]。双馈电机是风电场作业重要的无功源，在电网电压波动时进行双馈电机无功补偿方面发挥了重要作用[3-5]。根据对电网电压的无功控制可以有效地对电网电压进行调节，减少无功功率在电网中的流动，大幅度地降低电压输送无功功率造成的电能损耗，有效地改善电网的运行条件。

文献[6]提出基于中压配电网对PLC无功补偿特性分析。通过中压配电网进行无功补偿分析，

陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2014JM7293)

指出经过配电变压器处理过后的电压直接接入中压配电网的无功补偿装置中，在此PLC模型的基础上，分析无功补偿容量、数量和位置对配电网的载波信号的影响规律。该方法能够直接接入补偿点对中压配电网进行无功补偿，但是补偿的效果不明显。文献[7]提出基于电网故障下含DFIG的风电场暂态电流无功补偿特性分析。该方法在双馈电机模型的基础上，分析了电网故障下电流短路的表达式和电机的运行速度、数量等无功补偿因素，进一步分析电网短路电流对电机的主要影响。该方法得出风电场故障电流特性是无功补偿的重要依据，但是在进行无功补偿的过程中容易出现误差，导致无功补偿前和补偿后的区别不大。

1 双馈电机的无功补偿性能分析

1.1 电压波动时双馈电机的有功、无功输出功率分析

双馈电机风电场是重要无功源，能够补偿电网电压波动导致的无功需求，为了实现电网电压的准确补偿，保证电网电压稳定，需要先对电网电压波动时双馈电机的无功功率进行分析[8-9]。具体过程如下：双馈电机系统中，将双馈电机定子侧与电网相连接，转子侧间接与电网相连接，采用双向脉冲宽度调制转换器作为中间设备。双馈电机转子侧的转换器为转子侧转换器，用于控制系统转子电压，保证系统的运行；与电网相连接的转化器为网侧转换器，用于转子侧转换器的恒定直流母线电压供给，通常在高功率因数整流模式下运行。双馈电机的发电系统功率关系如图1所示。

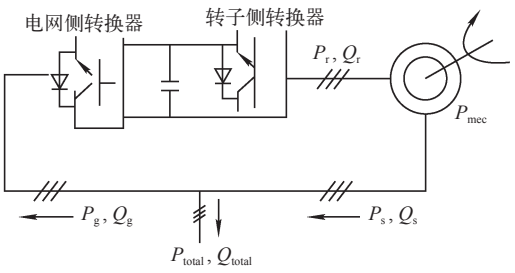


图1 双馈电机功率流向关系图

Fig. 1 Doubly-fed machine power flow diagram

图1中，P_{mec}为双馈电机的输入机械功率；P_s、Q_s分别为定子产生的有功与无功功率；P_g、Q_g分别为电网电压变换器的有功与无功功率；P_{total}、Q_{total}分别为双馈电机系统反馈到电网中的有功与无功功率。

从图1可得到双馈电机的定子、转子与电网侧输出的有功与无功功率之间的关系式为

$$\begin{cases} P_{total} = P_s \pm P_g = P_{mec} \\ Q_{total} = Q_s \pm Q_g \end{cases} \tag{1}$$

根据上式可知，网侧转换器接收或发送的有功与无功功率由双馈电机的运行状况决定，且网侧转换器的有功功率受到电机输入机械功率的约束，其无功功率能够进行可控性调节[10]。

在保证有功功率平衡的同时更改双馈电机的功率因数，即可调整电机无功功率的输出。在对双馈电机的功率因数进行变更时，需考虑电机运行的限制条件。根据双馈电机的运行约束条件来确定有功功率固定时的无功功率变更范围，双馈电机运行的限制条件为：定子电压$U_G \leqslant U_{GN}$；转子励磁电压$U_f \leqslant U_{fN}$；有功功率$P_G \leqslant P_{GN}$；其中U_{GN}、U_{fN}和P_{GN}分别为定子电压、转子励磁电压与有功功率的限定值。

根据双馈电机模型推导得到定子、转子电压及有功功率和无功功率之间的关系式如下

$$\begin{cases} P_s = U_s u_{q,s} I_{fN} / P_{total} = L_m U_s u_{q,r} / L_s \\ Q_s = (U_s u_{d,s} I_{GN} - U_s^2 / \omega_1 L_s) / Q_{total} \\ \quad = U_s[(L_m u_{d,r} / L_s) - (U_s / \omega_1 L_s)] \end{cases} \tag{2}$$

式中，U_s为定子侧电压；L_m为定转子的互感；L_s为定子侧自感；ω_1为电机的同步转速；$u_{q,s}$为定子q轴电压；$u_{d,s}$为定子d轴电压；$u_{q,r}$为转子q轴电压；$u_{d,r}$为转子d轴电压。

电网电压波动时，转子侧的励磁发生改变，励磁电压的变动会引发定子侧电压的变化，进而引发无功功率的变化，同时功率因数也会随之改变。根据双馈电机的最大输入机械功率的转换率，在固定功率因数的同时，通过变更网侧转换器的无功分量对电网电压波动导致的无功需求进行补偿。

在电机正常运行的状况下，输入机械功率的变化将引起电机输出有功功率的变化。当电网电压波动时，需要补偿网侧转换器的无功分量来供给需要的无功功率，提升电网电压的质量，并提高稳定性。

双馈电机的网侧转换器运行状态通常为单位功率因数，即u_q=0。在设定网侧转换器的容量时，只考虑电机转子转速与同步转速之比最大时的有功功率。通过使网侧转换器在无功功率规定范围内以非单位功率因数模式运行的方式，来对网侧无功功率进行补偿，以满足双馈电机的无功功率要求[11]。

设网侧转换器设置的功率最大值为P_{gmax}，根据$P_{\mathrm{g}}^2+Q_{\mathrm{g}}^2\leqslant P_{\mathrm{gmax}}^2$可得，无功功率输出范围为$-\sqrt{P_{\mathrm{gmax}}^2-P_{\mathrm{g}}^2}\leqslant Q_{\mathrm{g}}\leqslant\sqrt{P_{\mathrm{gmax}}^2-P_{\mathrm{g}}^2}$。网侧转换器是为了确保在电压稳定输出时，实现输出的有功与无功功率解耦，通过对u_d、u_q的独立控制，进而实现对网侧转换器的有功与无功功率补偿。处理后的功率表达式如下

$$\begin{cases}P_{\mathrm{g}}=u_{\mathrm{s}}u_dP_{\mathrm{s}}\\Q_{\mathrm{g}}=-u_{\mathrm{s}}u_qQ_{\mathrm{s}}\end{cases}\tag{3}$$

进一步计算电网电压波动下，n台双馈电机组成的电场输出有功、无功功率为

$$\begin{cases}P_{\text{total-g}}=P_{\mathrm{g}}\sum_{u'=1}^{n}u_{\mathrm{s}}^{u'}u_d^{u'}\\Q_{\text{total-g}}=Q_{\mathrm{g}}\sum_{u'=1}^{n}-u_{\mathrm{s}}^{u'}u_q^{u'}\end{cases}\tag{4}$$

1.2 电压波动时双馈电机的无功补偿特性分析

根据输出的有功、无功功率以及不对称分量检测，采用对称分量的方法进行计算，去除电网电压不对称的影响，采用瞬时无功理论方法将电压转换到PQ坐标系下(u_p, u_q)，用低通滤波器去除负序以及谐波分量，将坐标进行反变换得到正序电压(u_{sa}^+, u_{sb}^+,u_{sc}^+)，再将被测电压以及电网电压进行坐标相乘后，利用低通滤波器进行处理，获取基波量信息。其中，$P_{1\mathrm{N}}$和$Q_{1\mathrm{N}}$为基波正序分量虚部，以正序电压进行$PQ-B$计算，求出电纳值。

利用下式给出$PQ-B$表达式

$$\begin{aligned}B_{\mathrm{ab}}&=\frac{1}{3u_1^2}(Q_{1\mathrm{S}}+Q_{1\mathrm{N}}+\sqrt{3}P_{1\mathrm{N}})Q_{\text{total-g}}\\B_{\mathrm{bc}}&=\frac{1}{3u_1^2}(Q_{1\mathrm{S}}-2Q_{1\mathrm{N}})(u_{\mathrm{sa}}^+,u_{\mathrm{sb}}^+,u_{\mathrm{sc}}^+)Q_{\text{total-g}}\\B_{\mathrm{ca}}&=\frac{1}{3u_1^2}(Q_{1\mathrm{S}}+Q_{1\mathrm{N}}-\sqrt{3}P_{1\mathrm{N}})Q_{\text{total-g}}\end{aligned}\tag{5}$$

根据式（5）得到的电纳值（B_{ab}, B_{bc}, B_{ca}）减去FC电纳量，从而得到等效电纳，以此推导出晶闸管的导通角δ。为了保持线性特性不变，利用导通角δ与电纳值之间存在非线性关系进行线性变换，则

$$B_{\mathrm{L}}=\frac{\delta-\sin\delta}{\pi X_{\mathrm{L}}}=B_{\mathrm{Lmax}}\frac{\delta-\sin\delta}{\pi}\tag{6}$$

触发角α表达式为

$$\alpha=\pi-\frac{\delta}{2}+\varphi^*\tag{7}$$

式中，φ^*为相电压u_{a}的相角。

为了提高补偿准确度，利用有源滤波器（APF）进行谐波检测，增加了电网补偿环节，以保证系统的稳定性。主要表现为以下几个方面[12-13]：①对电网运行过程中产生的谐波进行检测。②对电网负载谐波电压进行检测。③对补偿后的电网进行检测，实现电压闭环控制。

利用触发角α得到电压波形u_{TCR}为

$$u_{\mathrm{TCR}}=\begin{cases}\cos(\alpha+\frac{\pi}{6})-\cos(\omega t+\frac{\pi}{6}) & \alpha\leqslant\omega t\leqslant2\pi-\alpha\\-\cos(\alpha+\frac{\pi}{6})-\cos(\omega t+\frac{\pi}{6}) & 0\leqslant\omega t\leqslant\pi-\alpha,\pi+\alpha\leqslant\omega t\leqslant2\pi\end{cases}\tag{8}$$

假设提取其中包含的基波分量，则剩余的为谐波分量，固定电压分量的表达式为

$$U_1=\frac{1}{\pi}[2(\pi-\alpha)+\sin2\alpha]\tag{9}$$

根据式（9）给出基波电压分量的时域波形

$$u_1=\frac{1}{\pi}[2(\pi-\alpha)+\sin2\alpha]\cos\omega t_*\tag{10}$$

根据叠加定理，以式（10）减去式（8）的电压，去除无功补偿器（SVC）中固定电压分量

$$u_{\text{trch}}^{*}=\frac{U_{\text{sm}}}{\omega L_{\text{T}}}(u_{\text{l}}-u_{\text{TCR}}) \tag{11}$$

为提高系统的综合无功补偿动态响应速度以及补偿容量，需要在SVC不能或未来得及完全补偿电网负载无功的情况下，投入无功补偿功能，保证系统的稳定运行。将SVC同电网负载看作无功负载，并且无功指令值并不直接从传感器得到，而是在SVC无功控制环中，将电网电纳反馈环节得到的误差电纳ΔB_{s}与对应线电压相乘得到补偿电压，进行电网电压反馈控制，此时电压转转为

$$u_{q*}^{*}=U_{\text{sm}}\Delta B_{\text{s}}\cos\omega t_{*} \tag{12}$$

将SVC中的固定电容分量进行去除，对电网电压进行补偿控制，实现对电压波动时双馈电机的无功补偿

$$g=\frac{U_{\text{sm}}}{\omega L_{\text{T}}}(u_{\text{l}}-u_{\text{TCR}})\Delta B \tag{13}$$

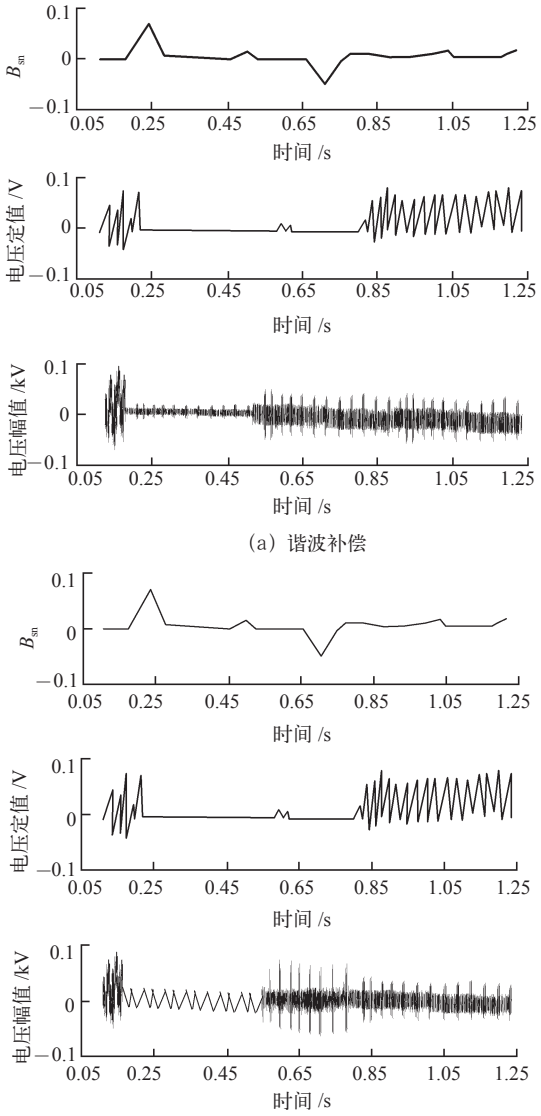
2 实验结果与分析

为了验证电网电压波动时双馈电机无功补偿的性能，需要进行相关实验[14-15]，在PSIM下搭建仿真环境，参数设置如下：电网电压幅值为3 kV，电机直流电压为1.8 kV，电容为2 000 μF，主电感值为2 mH，开关频率为4 kHz。

对双馈电机无功补偿和只谐波补偿两种情况进行对比实验，实验结果如图2所示，图中，B_{sn}为电网A相电纳。

图2a为只参与谐波补偿方法，图2b为双馈电机无功补偿方法。当时间为0.1 s时，两种方法因为无功检测缓慢，导致出现功率补偿延后的现象，又因为电压负载无功超出了补偿范围，导致图2a出现了无功补偿误差，而所提方法图2b的无功率补偿法能够有效发挥优势，使得双馈电机无功能够得到完全补偿。在双馈电机进行负载切换过程中，谐波补偿切换过程时间较长，而无功补偿在进行切换的过程中时间较短，补偿较为迅速。

根据电网网侧转换器对无功电压和无功分量参考值进行改变，补偿会因为电网电压幅值的波动，对双馈电机无功补偿造成一定影响，当电网电压幅值上升时，将双馈电机无功补偿方法与文



（a）谐波补偿

（b）无功补偿

图2 谐波补偿和无功补偿后的实验结果对比

Fig.2 Comparison of experimental results after harmonic compensation and reactive power compensation

献[6-7]进行无功补偿效果实验，实验结果如图3所示。

由图3可知，三种方法随着时间的不断增加，无功补偿都有所提高，当时间为2.0 s时，双馈电机的无功补偿为110 kvar，文献[6]的无功补偿为72 kvar，文献[7]的无功补偿为40 kvar；当时间为4.0 s时，双馈电机的无功补偿为150 kvar，文献[6]的无功补偿为83 kvar，文献[7]的无功补偿为43 kvar。实验结果表明，文献[7]的无功补偿效果最差，其次为文献[6]，本文研究的双馈电机无功

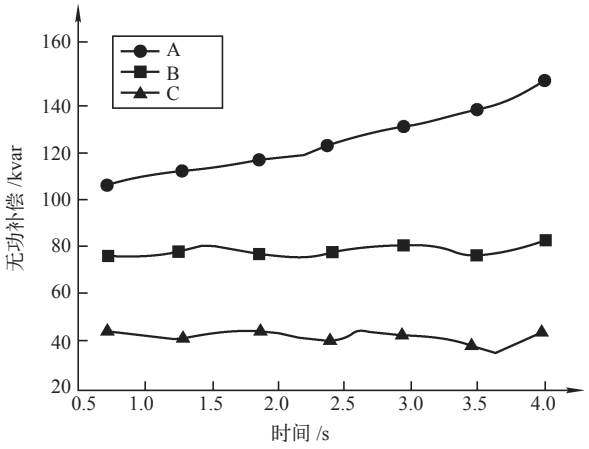


图3 不同方法无功补偿效果对比实验

Fig.3 Comparison of different methods of reactive power compensation

补偿效果最好，优于其他两种方法。

3 结束语

电网电压波动时双馈电机的无功补偿中，将风电场看作相对独立的无功电源，当电网电压波动引起电压变化时，需对电网电压进行反馈分析，并对电网电压反馈进行控制，实现对电压波动时双馈电机的无功补偿。实验结果表明，该方案具有一定的可行性，在电网电压波动时，双馈电机能够提供所需的无功，且补偿效果较好，同时具有较高的稳定性，可以有效地缓解电网的无功需求。

参考文献

[1] 殷桂梁，马会艳，陈学琴．电网电压波动时双馈电机的无功补偿特性分析[J]．电力系统及其自动化学报，2017，29(4)：84-88.
YIN Guiliang，MA Huiyan，CHEN Xueqin．Reactive compensation characteristic analysis of doubly-fed inductance genarator with grid voltage fluctuations[J]．Proceedings of the CSU-EPSA，2017，29(4)：84-88.

[2] 唐学用，叶航超，万会江，等．风电机组不同控制模式下SVC在改善电网电压质量中的应用[J]．电网与清洁能源，2016，32(10)：128-131.
TANG Xueyong，YE Hangchao，WAN Huijiang，et al．Application of SVC in improving power grid voltage quality under different control models of the wind turbine[J]．Advances of Power System & Hydroelectric Engineering，2016，32(10)：128-131.

[3] 许泽阳，范宏，李孜．基于RTDS的双馈风力发电系统无功补偿研究[J]．电气传动，2016，46(6)：15-18.
XU Zeyang，FAN Hong，LI Zi．Research on reactive power compensation of grid connected system of DFIG based on RTDS[J]．Electric Drive，2016，46(6)：15-18.

[4] 孙丽玲，邢东霞．弱电网下双馈感应发电机定子匝间短路故障时电网电压稳态分析[J]．电机与控制应用，2017，44(1)：71-76.
SUN Liling，XING Dongxia．Voltage steady state analysis of double-fed induction generator with stator winding inter-turn short circuit fault connected to a weak network[J]．Electric Machines & Control Application，2017，44(1)：71-76.

[5] 赵晶晶，胡晓光，吕雪，等．含STATCOM的双馈电机风电场无功电压协调控制策略[J]．电工电能新技术，2016，35(10)：17-22.
ZHAO Jingjing，HU Xiaoguang，LV Xue，et al．Research on coordination control strategy of DFIG wind farm with Crowbar circuit[J]．Advanced Technology Electrical Engineering and Energy，2016，35(10)：17-22.

[6] 王艳，王东，焦彦军，等．中压配电网无功补偿装置对PLC信道特性的影响分析[J]．电力系统保护与控制，2017，45(10)：62-68.
WANG Yan，WANG Dong，JIAO Yanjun，et al．Analysis of PLC channel characteristics of reactive power compensation equipment in medium-voltage distribution network [J]．Power System Protection and Control，2017，45(10)：62-68.

[7] 张谦，李凤婷，蒋永梅．电网故障下含DFIG的风电场暂态电流特性分析[J]．电力电容器与无功补偿，2017，38(2)：166-171.

ZHANG Qian，LI Fengting，JINAG Yongmei．Transient current characteristic analysis of wind farm containing DFIG under grid fault [J]．Power Capacitor & Reactive Power Compensation，2017，38(2)：166-171．

[8] 姜惠兰，李天鹏，吴玉璋．双馈风力发电机的综合低电压穿越策略[J]．高电压技术，2017，43(6)：2062-2068．
JIANG Huilan．LI Tianpeng，WU Yuzhang．Integrated low voltage ride through strategy for doubly-fed wind turbines [J]．High Voltage Technology，2017，43(6)：2062-2068．

[9] 王哲，林桦，王兴伟．独立运行无刷双馈发电系统负载侧变换器暂态无功电流补偿[J]．中国电机工程学报，2016，36(15)：4242-4248．
WANG Zhe，LIN Hua，WANG Xingwei．Transient reactive current compensation of load side converter of independent running brushless doubly-fed power generation system [J]．Chinese Society for Electrical Engineering，2016，36(15)：4242-4248．

[10] 李自明，姚秀萍，王海云，等．变速恒频双馈风力发电机组的等值模型和仿真验证[J]．电力电容器与无功补偿，2016，37(1)：91-95．
Li Ziming，Yao Xiuping，Wang haiyun．et al．Eqaivalent model and simulation verification of variable speed constant frequency double feed wind generator[J]．Power Capacitor & Reactive Power Compensation，2016，37(1)：91-95．

[11] 周玉琦，李东东，梁自超．故障下双馈感应风力发电机无功协调控制策略[J]．电力系统及其自动化学报，2016，28(7)：12-18．
ZHOU Yuqi，LI Dongdong，LIANG Zichao．Coordinative reactive power control strategy for DFIG under fault[J]．Proceedings of the CSU-EPSA，2016，28(7)：12-18．

[12] 郝晓弘，周勃．基于改进和声算法的含风电系统无功优化研究[J]．电力电容器与无功补偿，2017，38(2)：100-104．
HAO Xiaohong，ZHOU Bo．Study on reactive power optimization of wind power system based on improved harmony algorithm [J]．Power Capacitor & Reactive Power Compensation，2017，38(2)：100-104．

[13] 李培强，周丽英，李欣然，等．基于二次型函数指标的双馈风机对系统电压稳定性影响的分析[J]．电力科学与技术学报，2016，31(1)：17-24．
LI Peiqiang，ZHOU Liying，LI Xinran，et al．Analysis on DFIGs influence to system voltage stability based on quadratic function indexes[J]．Journal of Electric Power Science and Technology，2016，31(1)：17-24．

[14] 邢作霞，颜宁，肖婉秋，等．分散式风电场不同时间等级的多目标无功优化控制[J]．电机与控制学报，2016，20(11)：46-52．
XING Zuoxia YAN Ning，XIAO Wanqiu，et al．Multi-timescale multi-objective reactive power optimization of dispersed wind farm[J]．Electric Machines and Control，2016，20(11)：46-52．

[15] 陈宁，牛蔚然，张健，等．基于遗传算法的配电网无功补偿优化研究[J]．电子设计工程，2017，25(6)：58-61．
CHEN Ning，NIU Weiran，ZHANG Jian，et al．Remote sensing image fusion algorithm based on modified contourlet transform[J]．Electronic Design Engineering，2017，25(6)：58-61．

作者简介

布天文

布天文（1973－），男，本科，高级工程师，研究方向为电力技术。

(收稿日期：2018－05－10)EA