基于 Duffing 系统与 APES 算法的 DFIG 定子匝间故障检测新方法

许伯强,郑泽慧

(华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003)

摘要:简要介绍了 Duffing 振子信号检测和幅度相位估计(APES)算法的原理,提出将 Duffing 振子信号检测与 APES 算法相结合的双馈感应风力发电机(DFIG)定子匝间故障检测新方法。利用 Duffing 振子参数敏感性 及对背景噪声的强免疫性,根据相轨迹图变化判断是否存在待测故障特征,在此基础上结合 APES 算法确定 故障特征的振幅,弥补了 Duffing 振子无法提供准确幅值的不足。仿真结果证明了所提方法的实用性和有 效性。

关键词:双馈感应风力发电机;定子绕组匝间短路;Duffing 振子;APES 算法;故障检测 中图分类号:TM 307 文献标识码:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.015

0 引言

风力发电在新能源发电中具有广阔的发展空间,受到各国的普遍重视。双馈感应风力发电机 DFIG(Doubly-Fed Induction Generator)是目前技术较 为成熟、应用比较广泛的风力发电机^[1]。双馈发电 机组运行环境通常比较恶劣,故障发生率较大。据 统计,DFIG 定子绕组故障发生率较高,占 DFIG 电气 故障的 37%^[2]。轻微故障不会对发电系统造成威 胁,但如果不加控制而任其发展,将会导致相间短 路、接地短路等恶性故障。故对 DFIG 定子匝间故 障的故障机理和检测方法进行研究分析,对保障风 电系统的安全运行具有重要意义。

目前国内外学者对 DFIG 的定子绕组故障已经 开展了一些研究工作,其定子故障诊断方法可借鉴 笼型异步电动机的定子故障诊断方法。文献[3-5] 将 ESPRIT 算法和 MUSIC 算法引入电机故障检测 中,提高了精度和运算速度,可以精确地检测到故障 信号的频率、振幅和相位。此外,除了一般的分析信 号为定子电流外,文献[6]将派克矢量轨迹椭圆度 作为新的故障特征量,能够较好地实现定子绕组匝 间短路故障辨识。文献[7]提取由定子绕组匝间短 路故障引起的电流估计差的负序分量,该特征量能 够精准识别匝间短路系数并定位故障相,且对非理 想工况具有鲁棒性。文献[8]将序阻抗应用到双馈 电机故障检测中,较传统特征量具有高灵敏度和高 可靠性。文献[9]采用转子平均瞬时功率来检测定 子绕组故障,具有很强的抗干扰力。

本文通过分析转子侧电流频谱信号,将 Duffing

收稿日期:2018-04-09;修回日期:2019-03-27 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277077) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277077) 振子信号检测方法与幅度相位估计 APES(Amplitude and Phase EStimation)算法结合,提出了一种 DFIG 定子匝间故障检测新方法。采用 Duffing 振子进行 微弱信号检测的优越性在于:Duffing 振子对背景噪 声免疫且对微弱待测信号高度敏感;与传统的信号 检测系统相比,Duffing 振子信噪比高,能有效提高 微弱故障信号检测的准确度和精确度。但 Duffing 系统应用于故障检测时无法准确提供信号特征分量 的幅值,而各频率分量幅值对于判断故障严重程度 至关重要。为此,本文提出运用 APES 算法检测故 障信号的幅值。APES 算法突破了传统快速傅里叶 变换(FFT)算法的局限,对于短时信号仍具有很高 的频率分辨率,能够准确估计故障频率分量的幅值 和初相角。最后利用 MATLAB 搭建仿真平台,验证 了所提方法的有效性。

1 定子匝间短路故障特征分析

当 DFIG 发生定子匝间短路故障时,电流分布发 生改变,气隙圆形磁场不再对称,在定、转子电流中 将产生除基波以外的谐波分量。

DFIG 发生定子匝间短路故障时可假设在短路 线圈上叠加一同向电流,它在气隙中产生的磁场同 正常状态下的磁场相叠加,形成故障情况下的 磁场^[10]。

假设流过短路匝线圈的电流 $i_g = \sqrt{2} I \cos(\omega t)$,短路匝沿气隙圆周的空间电角度 $\gamma = p\theta$,发生定子匝间短路故障后,短路匝线圈的正反向磁动势的傅里叶级数展开式如式(1)所示。

$$f(\theta,t) = \frac{\sqrt{2}I}{\pi p} \sum_{v} \frac{1}{v} k_{yv} \cos(\omega t \pm v p \theta) \qquad (1)$$

其中,I为短路电流有效值;ω为定子电流角速度;k_{yv} 为短路匝节距因数;p为极对数;v为谐波次数,对于 ;*θ*

短距线圈,
$$v = \frac{1}{p}, \frac{2}{p}, \frac{3}{p}$$
(整距情况, $v \neq 2, 4, 6, \cdots$)

为以定子坐标表示的机械角度, $\theta = \varphi + \frac{(1-s)\omega t}{p}, \varphi$ 为

转子坐标表示的机械角度,s为转差率。

在转子坐标系中的匝间短路叠加电流的磁动势 $f(\varphi,t)$ 可以表示为式(2)。

$$f(\varphi,t) = \frac{\sqrt{2}I}{\pi p} \sum_{v} \frac{1}{v} k_{yv} \cos[\omega t \pm (1-s)v\omega t \pm vp\varphi] \quad (2)$$

由式(2)可知在转子侧感应出的电流分量的频 率为 ω ±(1-s) $v\omega$,设其电流分量表达式如式(3) 所示。

$$i_{\rm R} = \sum_{v} \sqrt{2} I_{\rm Rv} \cos[\omega t \pm (1-s)v\omega t] \qquad (3)$$

其中,I_{Rv}为转子侧电流 v 次谐波有效值。

由式(3)可知,磁动势 $f(\varphi,t)$ 在转子侧感应出 频率为 $[1\pm v(1-s)]f_1$ 的电流分量,幅值较大的有 $(2-s)f_1$ 分量和 $(2+s)f_1$ 分量^[11],其中 f_1 为定子侧电 流频率。

通过分析可知,当 DFIG 发生定子匝间短路故障后,转子电流将会感应出特定谐波分量。

2 基于 Duffing 振子的故障特征检测

考虑微弱故障信号的检测下限及信噪比、灵敏度、工作稳定性等,为实现对任意频率信号的检测, 常采用式(4)所示的 Duffing 状态方程。

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega_{\rm f} \, y \\ \dot{y} = \omega_{\rm f} \left[-ky + x - x^3 + A\cos(\omega_{\rm f}t) + s(t) \right] \end{cases} \tag{4}$$

其中,k 为阻尼比;A 为内策动力的振幅;ω_f 为策动 力的频率;s(t)为外输入信号。大多数研究中,为提 高系统的抗噪性能,取 k=0.5。当 Duffing 方程的其 他参数确定,外输入信号为0时,改变A的大小,当 A 从0逐渐增大时,系统将依次表现出倍周期振荡 状态、混沌状态和大周期状态,记从混沌状态变为大 周期状态的临界策动力幅值为A_d。

利用 Duffing 振子进行微弱信号检测的原理为: 将 A 设置为略小于 A_a 的值, 当将同频率的周期信号 加入 Duffing 振子时, 只要系统总的策动力幅值大于 A_a , 系统就会由混沌状态转变为大周期状态, 从而根 据系统的状态变化检测出是否存在频率等于 ω_f 的 周期信号。

由于 Duffing 振子的混沌阈值点与初始相位角 无关,本文将内策动力的初始相位角设定为 0,设待 测同频信号 $s(t) = Scos(\omega_t t + \varphi_f)$,其中 S 为待测信号 幅值, φ_f 为待测信号初相位,此时 φ_f 为内策动力和 待测信号的相位差。Duffing 系统具有很强的噪声 免疫性,在不考虑噪声影响时,式(4)中系统总的策 动力(合成策动力)为:

$$A_{d}\cos(\omega_{f}t) + s(t) = A_{d}\cos(\omega_{f}t) + S\cos(\omega_{f}t + \varphi_{f}) = F(t)\cos(\omega_{f}t + \theta(t))$$
(5)

$$F(t) = \sqrt{A_{\rm d}^2 + 2A_{\rm d}S\cos\varphi_{\rm f} + S^2} \tag{6}$$

$$\theta(t) = \arctan \frac{S \sin \varphi_{\rm f}}{A_{\rm d} + S \cos \varphi_{\rm f}}$$
(7)

其中,若 $S \ll A_d$,则 θ 的影响可忽略。分析可知,当 $\varphi_f \in (0, \pi - \arctan[S/(2A_d)]) \cup (\pi + \arctan[S/(2A_d)],$ 2π)时,若 $F(t) > A_d$,则系统由混沌状态变为大周期 状态,通过该变化可检测出待测故障信号,将此区 间称为可检测区;当 $\varphi_f \in (\pi - \arctan[S/(2A_d)], \pi + \arctan[S/(2A_d)])$ 时, $F(t) < A_d$,此时系统为混沌 状态,即使有同频信号加入,信号也会被误判为 没有同频信号加入,此时待测信号落入待测 盲区^[12]。

在仿真得出的故障转子电流信号中,含有多种 频率的分量,无法计算出每个频率对应的初相位。 为消除检测盲区,本文采用"试凑"的方法:首先计 算出待测频率每个周期的采样点数,将输入 Duffing 系统的待测信号的第1个点逐点往后平移,直至平 移1个周期的采样点数,以此改变待测信号的初始 相位,这样待测信号的初始相位会依次通过可检测 区和检测盲区,每平移1个点,观察相轨迹图的轨迹 变化。当平移1个周期的采样点数后,若相轨迹图的轨迹 变化。当平移1个周期的采样点数后,若相轨迹图 全部为混沌状态,说明该信号中不存在同频信号;若 相轨迹图既出现混沌状态,又出现大周期态,说明存 在同频信号。Duffing 振子处于混沌状态和大周期 状态的相轨迹图分别如图1(a)、(b)所示。利用"试 凑"的方法有助于提高 Duffing 系统的检测精度,消 除检测盲区带来的误判。



0

3 基于 APES 算法的幅值估计

APES 算法是由 Li 等人于 20 世纪 90 年代提出的一种新的滤波器设计方法,常用于估计信号幅值和相位,已在医学成像、雷达参数估计、间谐波检测等方面得到了应用,本文采用 APES 算法来检测特征频率的幅值,具体步骤参见文献[13]。

4 Duffing 振子信号检测与 APES 算法的仿 真验证

本文所模拟的 DFIG 基本参数为:额定电压为 575 V,额定频率为 60 Hz,极对数为 3,定子每相电 阻为 0.023 p.u.,转子每相电阻为 0.016 p.u.,定子每 相漏感为 0.18 p.u.,转子每相漏感为 0.16 p.u.,定转 子间的互感为 2.9 p.u., 匝间短路回路过渡电阻为 $0.01 \Omega_{\circ}$ 文献 [14] 已详细介绍了正常和定子匝间故 障下的 DFIG 模型,本文不再赘述。图 2 为基于 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建的双馈风力发电机 仿真模型示意图。图中,与电网相连的为网侧变流 器 GSC(Grid Side Converter): 与转子侧相连的为转 子侧变流器 RSC(Rotor Side Converter); i。为定子电 流;i_{Ba}、i_{Bb}、i_{Bc}分别为转子a、b、c相电流。



图 2 双馈风机模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of DFIG model

仿真中,设定风速为13.2 m/s、转差率为-0.2, 定子 a 相中的 1 个线圈在 2 s 时发生匝间短路故障。 应当注意的是,为了度量故障严重程度,本文定义故 障磁势比 k_a=短路匝数比×(匝间短路环电流/额定 电流)作为衡量故障严重程度的指标,故障磁势比越 大,则故障越严重。采用奇异值分解滤除转子电流 基频 sf₁^[15],正常情况和不同短路匝数比情况下转子 侧 a 相电流快速傅里叶变换(FFT)频谱如图 3 所 示。图中, I_{am}为转子 a 相电流幅值(标幺值, 后同); μ 为短路匝数比。

通过观察图3可知,正常情况下,转子电流中的 谐波成分很少,且幅值很小,随着故障程度的加深, (2-s)f₁的谐波成分(本仿真中即为 132 Hz 的谐波 成分)增加程度明显,在仿真条件为电网电压对称的 理想条件下,本文定子匝间故障的转子电流故障特 征频率为132 Hz。另外,工程实际中可将(2-s)f₁、 (2+s)f1同时作为故障特征,避免与定子绕组外部故 障(电网电压不对称等)引起的谐波分量相重合引 起误判。

检测方法步骤:

a. 采集转子 a 相电流,采样频率为 2 000 Hz;

b. 对采样信号进行奇异值分解以滤除 sf. 频率 分量,将滤波 sf₁成分后的信号加入到 Duffing 振子 系统中,观察相轨迹图的变化。

c. 对滤波以后的采样信号进行 APES 算法分 析,估计(2-s)f,频率分量对应的幅值;根据相轨迹





Fig.3 FFT spectrum diagrams of phase-a current of rotor

图及其(2-s)f₁ 频率分量的幅值判断 DFIG 的定子 是否发生故障以及故障程度。

在外界输入信号为0时,若A=0.834463,则混 沌系统的相轨迹为混沌状态,若A=0.834 467,正文 混沌系统的相轨迹为稳定大周期状态。为区别定子 匝间绕组正常和故障状态,使正常情况下相轨迹图 为混沌状态,本文将内策动力设置为0.833 467,当 摄入待测信号幅值大于 0.001 时,系统总策动力幅 值大于 0.834 467,相轨迹图将变为大周期状态(本 文为防止混沌系统灵敏度过高可能导致的误检,将 摄入待测信号幅值阈值设置为 0.001, 在工程实际中 其值可根据电机的先验样本数据进行相应调整)。 策动力频率 $\omega_{\rm f}$ 设为 $2\pi \times 132$ (rad/s),采样周期 T 赋 值为1/2000=0.0005(s),这样在信号的每个周期 内取15个点,将起始采样点数依次往后平移15个 点以进行试凑,当试凑 15 次时,如果相轨迹图没有

发生改变,则说明输入信号没有待测故障特征频率, 如果相位图变为大周期状态,则说明输入信号中有 该故障频率。图4为在正常情况和不同短路匝数比 μ下的相轨迹图。

106





Fig.4 Phase track diagram under normal state and different short circuit turns ratios

由图 4 可知,当 μ =0, μ =0.02 或 μ =0.05 时,相 轨迹图为混沌状态,不存在故障特征频率 132 Hz 或 者故障频率幅值小于 0.001 的情况;当 μ =0.10 或 μ =0.15时,相轨迹图出现大周期状态。故可判定当 μ ≥0.10 时,存在故障特征频率 132 Hz 且其对应的 分量幅值大于 0.001。

Duffing 振子系统无法准确提供信号特征分量 的幅值,而各频率分量幅值对于判断故障严重程度 至关重要,图 5 为采取 APES 算法后得到的不同短 路匝数比下的转子 a 相电流的频谱图,具体仿真数 据参见表 1。

由图 5 和表 1 数据可知,当转差率为-0.2 时,在 不同的短路匝数比情况下,FFT 方法和本文方法对 1 s和 5 s 仿真数据的检测幅值的结果相吻合,相轨 迹图变化状态与待测信号幅值相统一(大于 0.001 时为大周期态,小于 0.001 时为混沌态),说明 APES 算法是有效的,且该方法所需数据短(仅需 1 s 短时 数据),相比于 FFT 方法对 5 s 数据的分析,此方法 适用于负载波动、噪声干扰等情况。

图 6 为进行归一化处理(所有幅值除以基准值) 后,转子 a 相电流的频谱图(纵轴为标幺值),可以看



图 5 转子 a 相电流 APES 算法频谱图

Fig.5 Phase-a current spectrum of rotor with APES algorithm

表 1 Duffing 振子结合 APES 算法的分析结果

Table 1 Analysis results based on Duffing oscillator combined with APES algorithm

			0		
工况	k_{Φ}	132 Hz 分量幅值估计值			相轨迹图
		APES(1 s)	FFT(1 s)	FFT(5 s)	状态
正常	0	1.10×10^{-5}	1.80×10^{-5}	6.600×10^{-6}	混沌
$\mu = 0.02$	0.011	3.10×10^{-5}	3.40×10^{-5}	2.400×10^{-5}	混沌
$\mu = 0.05$	0.065	5.40×10^{-5}	4.60×10^{-5}	5.300×10^{-5}	混沌
$\mu = 0.10$	0.246	1.08×10^{-2}	1.25×10^{-2}	1.121×10^{-2}	大周期
$\mu = 0.15$	0.520	2.43×10^{-2}	2.53×10^{-2}	2.530×10^{-2}	大周期



图 6 转子 a 相电流频谱图



出,(2-s)f₁处的幅值随着故障磁势比的增加而增加,且其随着故障程度的加深幅值变化显著,说明 APES 算法在估计特征频率的幅值时,其灵敏度和可 靠性均得到了保证。

综上所述,利用 Duffing 振子检测待测故障特征 频率,对初值敏感,相轨迹变化灵敏,通过设置混沌 阈值点来调整对待测信号的幅值大小要求,当幅值 满足所需大小时,相轨迹图变为大周期状态,有利于 故障信号的判断;同时本文结合 APES 算法来准确 估计特征频率的幅值,检测精度高,为 DFIG 故障检 测问题提供了一种新的思路。

5 结论

本文将 Duffing 振子信号检测方法与 APES 算 法相结合应用到 DFIG 定子匝间短路故障检测中, 得出以下结论:

a. 利用 Duffing 振子进行故障信号特征检测,是 通过相位图的变化来判断是否存在待测故障特征信 号,直观方便且状态突变敏锐,具有信噪比高、精度 理想的优点;

b. 针对 Duffing 振子同频信号检测存在检测盲 区的问题,采用"试凑"的方法来消除检测盲区,实 现了 Duffing 振子的柔性测量;

c. Duffing 振子不能定量地故障特征信号的幅值,而 APES 算法可以准确估计特征频率信号的振幅、频率,二者相互融合、取长补短,为检测微弱故障信号提供了新的思路。

参考文献:

- 王宏胜,章玮,胡家兵,等. 电网电压不对称故障条件下 DFIG 风 电机组控制策略[J]. 电力系统自动化,2010,34(4):97-102.
 WANG Hongsheng,ZHANG Wei,HU Jiabing, et al. A control strategy for doubly-fed induction generator wind turbines under asymmetrical grid voltage conditions caused by faults[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,34(4):97-102.
- [2] 王致杰,徐余法,刘三明,等. 大型风力发电机组状态监测与智能故障诊断[M]. 上海:上海交通大学出版社,2013:58.
- [3] 孙丽玲,王续,许伯强. 基于 SVD 滤波技术与快速四阶累积量 ESPRIT 算法的异步电动机转子断条故障检测新方法[J]. 电工 技术学报,2015,30(10):147-156.
 SUN Liling, WANG Xu, XU Boqiang. A detection method for broken rotor bar fault in induction motors based on SVD and SFOC-ESPRIT [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(10): 147-156.
- [4]许伯强,孙丽玲,李和明. 基于高频率分辨力谱估计技术与优化 算法的异步电动机转子故障检测新方法[J]. 中国电机工程学 报,2013,33(3):140-147.

XU Boqiang, SUN Liling, LI Heming. A detection method for rotor fault in induction motors based on high ferquency resolution spectrum estimation technique and optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3):140-147.

[5]张滨生,喻乐,和敬涵,等. 基于快速 TLS-ESPRIT 的间谐波检测

算法[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):26-31.

ZHANG Binsheng, YU Le, HE Jinghan, et al. Inter-harmonic detection based on fast TLS-ESPRIT [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2); 26-31.

[6]魏书荣,张路,符杨,等. 基于派克矢量轨迹椭圆度的海上双馈 电机定子绕组匝间短路早期故障辨识[J].中国电机工程学报,2017,37(10):3001-3009.
WEI Shurong, ZHANG Lu, FU Yang, et al. Early fault detection based on the Park's vector locus ovality for inter-turn faults in stator windings of the offshore wind DFIG[J]. Proceedings of the CSEE,

2017,37(10):3001-3009. [7]魏书荣,李正茂,符杨,等. 计及电流估计差的海上双馈电机定 子绕组匝间短路故障诊断[J/OL].中国电机工程学报:1-9 [2018-03-06].

WEI Shurong, LI Zhengmao, FU Yang, et al. Inter-turn faults diagnosis on stator windings of offshore wind DFIGs considering current estimated difference[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-9[2018-03-06].

[8]魏书荣,张路,符杨,等.基于拟序阻抗的海上双馈电机定子绕 组匝间短路早期故障辨识[J].中国电机工程学报,2017,37 (1):273-282.

WEI Shurong, ZHANG Lu, FU Yang, et al. Early fault detection based on the quasi-sequence impedance for inter-turn faults in stator windings of offshore wind DFIG [J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(1):273-282.

[9]马宏忠,张艳,魏海增,等.基于转子平均瞬时功率的双馈异步 发电机定子绕组匝间短路故障诊断[J].电力自动化设备, 2018,38(4):151-156.

MA Hongzhong,ZHANG Yan,WEI Haizeng, et al. Diagnosis of stator winding inter-turn short circuit in DFIG based on instantaneous average power in rotor side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(4):151-156.

- [10] 王景婷.双馈式风力发电机故障特征分析与检测方法研究
 [D].保定:华北电力大学,2015.
 WANG Jingting. Analysis of the characteristics of the fault in doubly-fed induction generators and detection scheme research[D]. Baoding:North China Electric Power University,2015.
- [11] STEFANI A, YAZIDI A, ROSSI C, et al. Doubly fed induction machines diagnosis based on signature analysis of rotor modulating signals[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2008, 44(6): 1711-1721.
- [12] 牛德智,陈长兴,班斐,等. Duffing 振子微弱信号检测盲区消除 及检测统计量构造[J].物理学报,2015,64(6):71-83. NIU Dezhi,CHEN Changxing,BAN Fei,et al. Blind angle elimination method in weak signal detection with Duffing oscillator and construction of detection statistics[J]. Acta Physica Sinica,2015, 64(6):71-83.
- [13] 许伯强,李金卜. 基于奇异值分解滤波与 APES 算法的异步电动 机转子故障检测[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):165-169.
 XU Boqiang,LI Jinbo. Rotor fault detection based on SVD filtering and APES algorithm for asynchronous motor[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(8):165-169.
- [14] 许伯强,张舒怡. 定子故障下的双馈风力发电机组建模与稳定 性分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):93-99.
 XU Boqiang, ZHANG Shuyi. Modeling and stability analysis of

DFIG with stator fault[J]. Electric Power Automation Equipment, , 2016, 36(9):93-99.

[15] 孙丽玲,王续,许伯强. 基于 SVD 滤波技术与快速四阶累积量 ESPRIT 算法的异步电动机转子断条故障检测新方法[J]. 电工 技术学报,2015,30(10):147-156.

SUN Liling, WANG Xu, XU Boqiang. A detection method for broken rotor bar fault in induction motors based on SVD and SFOC-ESPRIT [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 147-156.

作者简介:



许伯强(1972—),男,河北保定人,教 授,博士,从事大型电机的状态监测与故障 诊断方面的研究工作(**E-mail**:xbq_ncepu@ 126.com);

郑泽慧(1993—),女,山西临汾人,硕士 研究生,从事双馈风力电机故障诊断方面的研 究工作(E-mail:15188610262@163.com)。

Novel method based on Duffing system and APES algorithm for stator winding inter-turn fault detection of DFIG

XU Boqiang, ZHENG Zehui

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The principles of Duffing oscillator signal detection and APES (Amplitude Phase EStimation) algorithm are briefly introduced. A novel method combining Duffing oscillator signal detection and APES algorithm is proposed for detecting stator winding inter-turn fault of DFIG (Doubly-Fed Induction Generator). Based on the sensitivity of Duffing oscillator parameters and the strong immunity to background noise, the presence of fault features to be measured is detected according to the phase map change, based on which, the APES algorithm is used to determine the amplitude of fault features to make up for the inadequacy that Duffing oscillator can not provide accurate amplitude. The simulative results show that the proposed method is practicable and effective.

Key words: doubly-fed induction generator; stator winding inter-turn short circuit; Duffing oscillator; APES algorithm; fault detection

(上接第 102 页 continued from page 102)

Power capacity optimization of microgrid with multiple subjects considering price incentive demand response

MA Guolong, CAI Zexiang, LIU Ping

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The optimal capacity configuration of wind, photovoltaic, diesel generator and energy storage is realized based on the price incentive demand response of consumers in the microgrid with multiple subjects. In the environment of electricity market, a two-stage optimization model is established by considering the different functions of multiple subjects in the microgrid. In stage 1, the complete information interactive game model between microgrid operators and consumers is established with the maximum consumer profits as its optimization objective, on the premise of protecting the interests of electricity retailers, based on which, the optimal peak-valley time-of-use electricity price strategy of microgrid is obtained, and then the demand response curves of consumers under the price incentive are obtained. In stage 2, the optimal capacity configuration strategies of different distributed generators in the microgrid are obtained with the maximum benefits of microgrid power investors as its optimization objective, which is based on the interactive game between the microgrid power investors and microgrid operators. The validity of the proposed model is verified by a simulation example based on the historical data of a certain region.

Key words: microgrid; optimal capacity configuration; interactive game; demand response; two-stage optimization; models; price incentive