

# 分布式能源对主动配电网谐波特性影响的研究

竺庆茸, 黄文杰, 徐修华, 张 韬

(南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 本文研究分布式能源对主动配电网谐波特性的影响, 首先将主动配电网中分布式能源按照谐波源类型进行分类, 即电流型和电压型谐波源; 其次利用仿真的方法, 当电流型谐波源的并网功率变化、谐波源的并网点负载特性变化和电压型谐波源的并网点变化时, 分析主动配电网中的谐波电流产生、传播和叠加的规律; 接着考虑电压型谐波源的负载功率不同、并网点不同的情况, 分析主动配电网中谐波电压的产生和传播规律; 最后根据仿真结果分析得出结论, 以指导主动配电网中各单元并网点的选取。

**关键词:** 主动配电网; 电流型谐波源; 电压型谐波源; 谐波传播; 谐波叠加

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)05-0093-05

## 0 引言

传统配电网通过增加电网容量裕度和调整电网结构以保证电网安全、稳定运行, 高渗透率分布式能源(distributed energy resource, DER)并网容易引起电网电压越限、双向潮流问题<sup>[1-5]</sup>。若通过调整电网结构频繁投切分布式电源解决, 成本太高; 且电力负荷增长率低, 增加电网容量裕度显然不科学。在此背景下, 国内外学者提出借用信息与通信技术和控制理论实现电网的主动控制, 以解决高渗透率 DER 接入的问题, 并于 2008 年在国际大电网会议(CIGRE)上提出了主动配电网(ADN)的概念, 指出 ADN 可以通过灵活的网络结构来管理潮流。DER 基本构成是: 分布式电源(DG, 包括光电 PV、风电 WPG 等)、分布式储能、可控负荷(电动汽车 EV、响应负荷 RL)<sup>[6-9]</sup>。

ADN 中的电能质量问题可分为以下几点<sup>[10-14]</sup>: (1) 谐波问题。ADN 中谐波源主要包括: 风电、光电、储能, 响应负荷的并网逆变器、储能和响应负荷的整流器、变压器、非线性负载及为解决电力系统自身的问题而投入的电力设备, 如调速电机和无功功率补偿设备。文中将其分为电压谐波源和电流谐波源。(2) 电压问题, 包括三相电压不平衡、电压波动、越限的问题。不平衡主要由于小容量 DG 采用单相逆变器并网, 电压波动和越限主要因为 DG 出力随机性大。

较传统配电网, ADN 中含有大量的大容量电力电子设备, 导致电压和电流波形畸变越来越严重;

且 DER 在 ADN 中的拥有“源”“荷”双重身份, 使 ADN 双向潮流、潮流反送; 再加上 DER 的间歇性、高随机性, 导致 DER 接入的节点电压波动和闪变现象更频繁。此外, ADN 系统阻抗因灵活多变的网络结构而不再恒定, 传统的低成本 LC 滤波器容易与系统发生谐振, 引起谐波电流或电压放大<sup>[11]</sup>, 烧毁电气设备, 特别是电容器和电抗器。

文中根据 ADN 中不同 DER 单元的谐波特性分别建立对应的谐波源模型, 包括电流型谐波源和电压型谐波源; 利用仿真对 DER 的谐波特性进行详细分析, 包括 DG/分布式储能等 DER 单元并网点、并网点负载特性对其谐波电流的影响, 进而分析谐波在 ADN 中的传播特性和谐波叠加特性; 最后分析了直流侧采取大电容滤波的二极管整流电路的电压谐波源给 ADN 带来的电压谐波的影响, 考虑了整流器功率、接入点位置对电压畸变在 ADN 中传播的影响。

## 1 DER 的谐波源模型

文中建立了便于研究 ADN 谐波问题的 DER 谐波源模型, 选用的 ADN 模型是在范明天教授所提出的模型基础上进行了适当修改。DG、分布式储能、可控负荷都是通过电力电子装置与电网连接, 采用三相 PWM 电压型变流器装置, 交流侧经过滤波电感与电网相接的功率开关电路, 可将其视为电流型谐波源。而直流侧采用大电容滤波的单相/三相二极管整流电路(下文简称为二极管整流器), 由于直流侧电压基本保持不变, 而交流侧电压因由直流侧电压决定而含有大量的谐波, 故可将其视为电压型谐波源<sup>[16]</sup>, 如电动机变频器整流电路、计算机电源、二极管灯整流器等。

收稿日期: 2017-04-20; 修回日期: 2017-06-02

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(SJZZ16\_0291)

文中仅对 380 V 低压主动配电网谐波特性进行研究,ADN 系统结构图如图 1 所示。图中, $v_s$  为上级配电网电压,线电压有效值为 10 kV,短路容量 100 MW; $R_s, L_s$  为系统阻抗; $T$  为容量为 200 kV·A、变比为 10 kV/0.4 kV 的有载调压器; $Z$  为线路阻抗; $L_{T1}, R_{T1}, L_{T2}, R_{T2}, L_{T3}, R_{T3}$  为负载;DER1、DER2 模拟光伏、风电等 DER;LF、LF1 表示并网用低通滤波器;Rec 为整流器; $A, B, C, D, E$  分别表示 ADN 的 5 个节点。

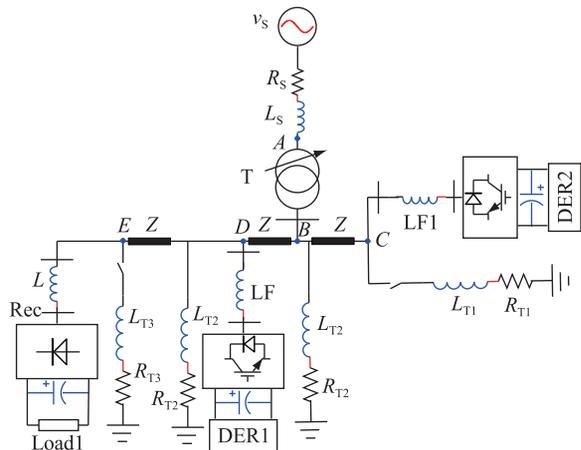


图 1 主动配电网结构

Fig.1 Structure diagram of active distribution network

### 1.1 电流型谐波源和谐波源模型

因采用成熟的 PQ 解耦控制和 PWM 调制技术,DER 并网的低次谐波电流显著下降,然而仍存在一定量的开关频率次谐波和边频带频率次谐波。换流器输出侧采用 L、LC 或 LCL 低通滤波器,但由于系统阻抗及其变化,仍会导致换流器滤波效果下降,故 DG 并网换流器注入电网的谐波电流主要为高次谐波。当 DER 并网功率小于并网换流器的额定容量时,谐波含量成倍增加。注入 ADN 的谐波电流流经电网阻抗时又会产生谐波电压,因此给 ADN 引入谐波电压。

为了详细研究 DER 并网对 ADN 谐波特性的影响,建立如图 2 所示的谐波模型。图中  $i_g$  为电网电流; $u_g$  为电网电压; $i_{sh}$  为电网电流谐波。DER 以谐波电流源的形式向 ADN 注入谐波电流,由于 DER 阻抗并非无穷大,故采用理想的电流谐波源和等效阻

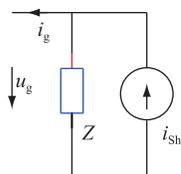


图 2 分布式电源等效电流型谐波源

Fig.2 Equivalent current harmonic source of distributed power supply

抗并联的形式<sup>[17]</sup>。

### 1.2 电压型谐波源和谐波源模型

直流侧为电容的二极管整流电路,交流侧电压完全由直流侧电压和二极管的开关状态决定,不能再将其视为电流型谐波源,必须考虑建立其他种类的谐波源模型。

若二极管整流器直流侧为无穷大电容、电压恒定,可将此状态下的分布式储能电池视作理想的电压型谐波源;然而直流侧电容不可能为无穷大,因此一般将其等效为理想电压型谐波源和等效阻抗  $Z$  的串联,直流侧电容越大, $Z$  越小,反之越大。等效模型如图 3 所示,其中  $v_{sh}$  为电网电压谐波。

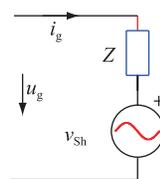


图 3 二极管整流器等效电压型谐波源

Fig.3 Equivalent voltage harmonic source of Diode rectifier

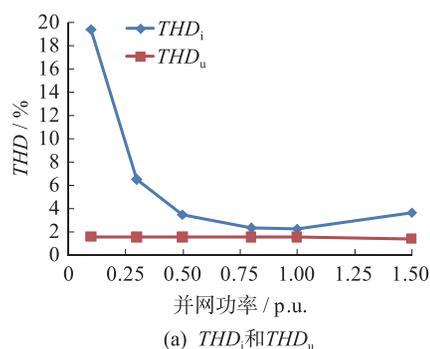
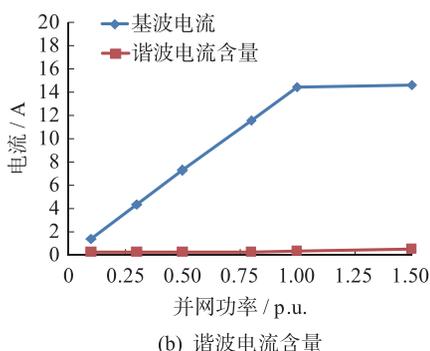
## 2 ADN 中 DER 谐波特性分析

常见的光伏、风电、分布式储能等 DER 都是利用三相换流器实现并网的,且它们使用的三相换流器结构和控制策略相同,常采用通过闭环控制并网的有功和无功功率的控制策略(PQ 控制策略),文中仿真基于此控制策略完成。由于光伏和风电自身间歇、波动的特性,并网时其换流器并非工作在额定功率下,而分布式储能要实现“削峰填谷”作用,其换流器也常工作在非额定功率下。所以,本节同时研究光伏、风电、分布式储能等 DER 给 ADN 带来的谐波方面的影响。

### 2.1 DG/分布式储能不同功率并网时的谐波特性

利用额定功率  $P$  为 10 kW 的并网换流器在节点 E 并网,并网点负载为纯阻性负载,功率为 5 kW,其余各节点的负载视在功率为 5 kW+j5 kVar。不同功率并网时基波电流,电流总谐波畸变率( $THD_i$ )、电压总谐波畸变率( $THD_u$ )及谐波电流含量如图 4 所示。

由图 4 可知,DG/分布式储能接入 ADN 的谐波具有以下规律:(1) DG/分布式储能等 DER 的并网换流器工作在其额定功率的 10%、30%、50%、80% 时, $THD_u$  基本保持不变,与并网换流器工作在额定功率下的  $THD_u$  基本相同; $THD_i$  数倍于并网换流器工作在额定功率下的  $THD_i$ ,但谐波电流含量(谐波电流绝对值)则变化不大,小于额定功率下的谐波

(a)  $THD_i$ 和 $THD_u$ 

(b) 谐波电流含量

图4 不同功率并网时基波电流、 $THD_i$ 和 $THD_u$ 及谐波电流含量Fig.4 Fundamental current,  $THD_i$ ,  $THD_u$  and harmonic current content at different power

电流绝对值。值得注意的是,当 DG 并网换流器工作在大于额定功率时,其谐波电流含量将明显增大。(2) 对并网电流进行傅里叶分析可发现:低次谐波电流比较大,且大于离网运行时的各次谐波;通过比较 DG 离网和并网仿真结果可得:并网换流器的低通滤波器因受系统阻抗影响,滤波效果下降。(3) 202、204 次谐波含量较高(系统仿真开关频率为 10 kHz),其频率约等于并网换流器的开关频率。

## 2.2 谐波在 ADN 中的传播特性

DG/分布式储能节点 E 并入 ADN 时,各节点负载都为阻感性负载  $S = 5 \text{ kW} + j5 \text{ kVar}$ ,观察 ADN 各节点谐波情况,仿真结果如表 1 所示;改变并网点的负载特性,即改变无功功率大小,观察节点 E 的谐波特点,其仿真结果如表 2 所示。

表 1 各节点基波电压有效值和  $THD_u$  及谐波电流含量Table 1 Fundamental voltage RMS,  $THD_u$  and harmonic current of each node

项目	E	D	C	B	A
基波电压/V	224.9	226.1	227.1	228.5	5773
$THD_u/\%$	8.57	6.24	3.83	3.28	0.04
谐波电流含量/A	0.40	0.39	0.02	0.38	0.02

由表 1 可知,DG/分布式储能等 DER 的并网节点固定时,配电网末端的  $THD_u$  最高,越接近配电网始

表 2 不同负载情况下并网的  $THD_i$  和  $THD_u$  ( $S = 5 \text{ kW} + jQ$ )Table 2  $THD_i$  and  $THD_u$  of grid connected under different load conditions

项目	$S = 5 \text{ kW} + jQ/\text{kVar}$			
	0.5	1	5	10
$THD_i/\%$	3.09	3.13	2.75	2.29
谐波电流含量/A	0.45	0.46	0.41	0.34
$THD_u/\%$	7.47	8.05	8.57	8.73

端的  $THD_u$  越低;负荷节点 C 处谐波电流很小,节点 E、D、B 谐波电流含量基本相等,可知由并网点注入 ADN 的绝大部分谐波电流都经主干线路流入电网系统。由表 2 可知,改变并网点负载感性,使无功功率与有功功率之比为 0.1、0.2、1、2 时,并网点的谐波电流含量基本保持不变; $THD_u$  则随着感性功率比例的增加而升高。且与图 4 相比,由于并网点负载从纯阻性负载变为阻感性负载, $THD_u$  陡增了数倍,进而电压畸变传播使整个同级配电网谐波电压含量升高,由于电压畸变的传播遇到变压器会被隔离,因此上级配电网因为有变压器的隔离和较大的短路容量而几乎不受影响。

此外,ADN 中相同功率的 DG/分布式储能等 DER 在不同位置并网,也会表现出不同的谐波电压、电流特性。利用一个额定功率为 10 kW 的换流器分别在节点 B、C、D、E 处接入 ADN,其  $THD_u$ 、 $THD_i$  如表 3 所示。

表 3 不同并网点下的  $THD_i$  和  $THD_u$ Table 3  $THD_i$  and  $THD_u$  at different grid connection points

项目	E	D	C	B
$THD_i/\%$	3.54	3.39	3.04	2.03
$THD_u/\%$	8.57	6.14	5.1	2.69

由表 3 可知,随着 DG/分布式储能等 DER 并网节点越靠近电网末端,并网的  $THD_i$  就越大, $THD_u$  增大的越明显。即并网  $THD_i$  受系统阻抗(负载和线路阻抗)影响较小, $THD_u$  与系统阻抗关系较大,且主要与感抗有关,与电阻无关。

## 2.3 ADN 中 DG/分布式储能等谐波源的叠加特性

在节点 E 同时并入两个额定功率相等的 DG/分布式储能等 DER,且其并网换流器都工作在额定功率状态下,并网点负载为阻感性负载  $S = 5 \text{ kW} + j5 \text{ kVar}$ ,观察 ADN 各节点的  $THD_u$  和总谐波电流含量,如表 4 所示。

两个 DG/分布式储能等 DER 分别在节点 E、D 并网,其余仿真条件与表 4 仿真条件完全相同,仿真结果如表 5 所示。

表4 各节点基波电压有效值和  $THD_u$  及总谐波电流含量

项目	E	D	C	B	A
基波电压/V	223.7	224.9	227.0	227.4	5772
$THD_u/\%$	15.36	11.20	6.66	5.89	0.07
谐波电流含量/A	1.26	1.23	0.04	1.21	0.04

表5 各节点基波电压有效值和  $THD_u$  及总谐波电流含量

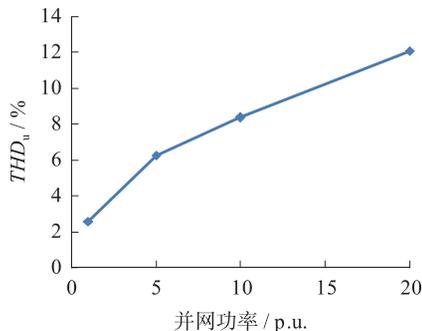
项目	E	D	C	B	A
基波电压/V	223.8	225.0	227.1	227.4	5772
$THD_u/\%$	13.38	10.89	6.06	5.58	0.07
谐波电流含量/A	0.54	1.00	0.04	0.97	0.04

由表4、5可知,并网点的不同导致并网点的  $THD_u$  有一定的差异,且与表1对比可知,两个同功率的DG/分布式储能等DER并网时,ADN各节点的  $THD_u$  约等于单个DG并网时  $THD_u$  的两倍;推广到  $n$  个DER单元并网,ADN各节点的  $THD_u$  约等于单个DER单元并网时的  $n$  倍;ADN各节点的总谐波电流含量大于单个DG并网时的2倍,推广到  $n$  个DER单元并网,ADN各节点的谐波电流含量大于  $n$  倍的单个DER单元并网时的谐波电流含量。

### 3 电压型谐波源谐波特性分析

#### 3.1 二极管整流器功率与 $THD_u$ 的关系

二极管整流器在节点E接入ADN,通过改变直流侧电阻功率,观察接入点E的  $THD_u$ ,如图5所示。

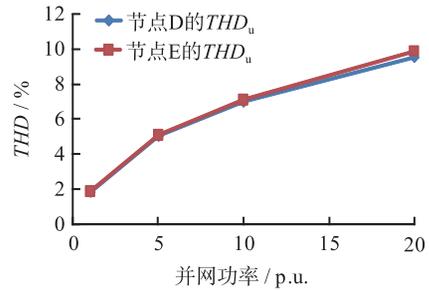
图5 不同功率下  $THD_u$ Fig.5  $THD_u$  at different power

由图5可知,随着二极管整流器功率的增大,ADN接入点的  $THD_u$  增加,但并不是成比例增加。

#### 3.2 接入点与 $THD_u$ 的关系

与图5相比,改变二极管整流器接入点,在节点D接入ADN,整流功率与图5中的整流功率相同,

观察节点D、E的  $THD_u$ 。

图6 不同功率下的基波电压有效值和  $THD_u$ Fig.6  $THD_u$  at different power

与图5相比,由于改变了二极管整流器的接入位置,更接近公共连接点(PCC),因此  $THD_u$  略微降低。通过仿真还发现,整个ADN系统的负载特性也会影响  $THD_u$ ,负载感性功率所占比例越大,二极管整流器为系统带来的电压畸变就越严重。

#### 3.3 畸变电压传播特性

在ADN的节点D接入功率为10kW二极管整流器,观察ADN各节点的  $THD_u$ ,仿真结果如表6所示。

表6 ADN各节点的  $THD_u$ 

项目	E	D	C	B	A
基波电压/V	223.5	224.7	227.4	227.8	5772
$THD_u/\%$	7.10	6.99	3.01	3.11	0.04

由表6可知,电压谐波源越接近ADN末端,电网的  $THD_u$  越大,越靠近ADN始端,  $THD_u$  越小。当然,ADN短路容量和变压器容量也会影响ADN各节点的  $THD_u$ ,容量越大,  $THD_u$  就越小。

### 4 结语

DG/分布式储能等DER并网相关标准要求在非额定功率下并网谐波电流含量小于额定功率下并网谐波电流含量,但DG/分布式储能等DER在非额定功率并网时的  $THD_u$  却远远超过5%,若借以合适的调度手段,使并网换流器只工作在额定功率和不工作两种状态,则可大幅降低ADN的  $THD_u$ 。

由上述分析可得出以下结论:(1)ADN中,DER并网产生的谐波电流基本都经主干线路流入电网系统,负荷节点几乎无谐波电流流入,故就地治理能获得最佳效果。(2)并网节点负荷特性会影响DER并网的电压畸变程度。若并网节点负载为纯阻性负载,则  $THD_u$  极小;若并网节点负载为阻感性负载,则  $THD_u$  就会很大。(3)直流侧采取大电容滤波的二极管整流器为典型的电压型谐波源,其接入点

$THD_u$ 与整流器功率密切相关。此外,电压畸变会传播至整个同级电网,越靠近 ADN 线路末端  $THD_u$ 就越大,越接近 ADN 线路始端, $THD_u$ 就越小。

#### 参考文献:

- [1] 韦 钢,吴伟力,胡丹云,等. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术,2007,33(1): 36-40.  
WEI Gang, WU Weili, HU Danyun, et al. Distributed generation and effects of its parallel operation on power system [J]. High Voltage Technology, 2007, 33(1): 36-40.
- [2] ACKERMANN T, ANDERSSON G, SODER L. Distributed generation; a definition 1 [J]. Electric Power Systems Research, 2001, 57(3): 195-204.
- [3] 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 Zhiqun, ZHU Shouzhen, ZHOU Shuangxi, et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 56-60.
- [4] 王 敏,丁 明. 含分布式电源的配电系统规划[J]. 电力系统及其自动化学报,2004,16(6): 5-8.  
WANG Min, DING Ming. Distribution network planning including distributed generation [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2004, 16(6): 5-8.
- [5] 柳 睿,杨镜非,程浩忠,等. 分布式电源并网的综合评价[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(1): 34-39.  
LIU Rui, YANG Jingfei, CHEN Haozhong, et al. Comprehensive evaluation of grid-connected distributed generation [J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation, 2013, 25(1): 34-39.
- [6] D'ADAMO C, JUPE S, ABBEY C. Global survey on planning and operation of active distribution networks; update of CIGRE C6.11 working group activities [C] // CIGRE 2009 (20th International Conference on Electricity Distribution). Prague, CZ: IET Services Ltd, 2009: 1-4.
- [7] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报,2013,36(22): 12-18.  
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2013, 36(22): 12-18.
- [8] 范明天. 2010 年国际大电网会议配电系统及分散发电机组研究进展与方向[J]. 电网技术,2010,34(12): 6-10.  
FAN Mingtian. Strategic plans of CIGRE distribution system & disperse generation (C6) [J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 6-10.
- [9] SAMUELSSON O, REPO S, JESSLER R, et al. Active distribution network—demonstration project ADINE [C] // Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, IEEE, 2010: 1-8.
- [10] 谢秉鑫,王 宗,范士林. 分布式电源对于配电网谐波特性的影响[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(2): 116-119.  
XIE Binxin, WANG Zong, FAN Shilin. Influence on harmonic characteristics of distributed network with distributed generations [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 116-119.
- [11] GB/T14549—1993 电能质量 公用电网谐波[S]. 北京: 中国电力出版社,2008.  
GB/T 14549—1993 Power quality Power system frequency deviation [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [12] 张 芳,徐 卓,徐荆州. 分布式发电对配电网供电可靠性的影响[J]. 江苏电机工程,2008,27(1): 38-40.  
ZHANG Fang, XU Zhuo, XU Jingzhou. Effect of distributed generation on the power supply reliability in distribution network [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2008, 27(1): 38-40.
- [13] 崔红芬,汪 春,叶季蕾,等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制,2015(10): 91-97.  
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2015(10): 91-97.
- [14] WALLING R A, SAINT R, DUGAN R C, et al. Summary of distributed resources impact on power delivery systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1636-1644.
- [15] 李 欣,蒋 平,徐杏桃. 模态分析法在无源滤波参数设计校核中的应用[J]. 江苏电机工程,2008,27(4): 48-51.  
LI Xin, JIANG Ping, XU Xingtao. Application of modal analysis in parameter checking of passive filters [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2008, 27(4): 48-51.
- [16] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社,2016.  
WANG Zhaoan. Harmonic suppression and reactive power compensation [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2016.
- [17] 姚为正,王 群,刘进军,等. 有源电力滤波器对不同频率谐波源的补偿特性[J]. 电工技术学报,2000,15(6): 40-44.  
YAO Weizheng, WANG Qun, LIU Jinjun, et al. Compensation characteristic of active power filter to different type of harmonic source [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(6): 40-44.

#### 作者简介:



竺庆茸

竺庆茸(1991—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为新能源发电与并网技术(E-mail: 745599730@qq.com);

黄文杰(1991—),男,江苏苏州人,硕士研究生,研究方向为新能源发电及光伏与储能(E-mail: 745599730@qq.com);

徐修华(1991—),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向为电能质量控制技术(E-mail: 757716714@qq.com);

张 韬(1994—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,研究方向为电力电子及新能源技术(E-mail: 709223160@qq.com)。

## Reliability and Life Analysis of Energy-storing Spring for High Voltage Circuit Breaker

TIAN Tao<sup>1</sup>, ZHANG Zhaojun<sup>1</sup>, ZHU Chao<sup>1</sup>, CHEN Hao<sup>1</sup>, WANG Yangyingfu<sup>2</sup>, ZHANG Jianzhong<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China;

2. Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The conception of stress-strength interference model for mechanical reliability analysis is introduced and the reliability model of cylindrical helical spring is given in this paper. Combining the strength degradation model, the phenomenon of spring reliability decreasing with the operation times is investigated, where the reliability of the spring is correlated with the operation times of the high voltage circuit breaker. According to the stress relaxation model and combination of stress relaxation factor which considering the reliability model with strength degradation, the stress-strength interference model considering stress relaxation and strength degradation is built. After that the life of breaker's energy-storing spring is predicted. Finally, the feasibility of this method is verified by the calculation example of a specific energy-storing spring.

**Key words:** reliability; strength degradation; stress relaxation; circuit-breaker

(编辑 陈娜)

(上接第 97 页)

## The Impact of Distributed Energy on Harmonic Characteristics in Active Distribution Network

ZHU Qingrong, HUANG Wenjie, XU Xiuhua, ZHANG Tao

(School of Power Engineering Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** In this paper, the influence of distributed energy on the harmonic of active distribution network is studied. Firstly, the distributed energy in active distribution network is classified according to the type of harmonic source, which includes current type and voltage type harmonic source. Then harmonic current's generation, propagation and superposition rules are analysed by simulation method, as the harmonic source's power, the load at connected point and connected point change. The generation and propagation of harmonic voltage in ADN are studied, considering the power and connected point of the harmonic source' change. As the simulation results, the conclusions are drawn to guide the connected points' selection of the units in ADN.

**Key words:** active distribution network; current mode harmonic source; voltage mode harmonic source; harmonic transformation; harmonic superposition component

(编辑 刘晓燕)

(上接第 102 页)

## A Review of Insulation Design and Partial Discharge Detection of DC Gas Insulated Line

ZHAO Ke, WANG Jingjun, LIU Tong, HE Pan

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Gas insulated line (GIL) occupies an increasing proportion in the transmission system. The promotion of DC GIL can improve the existing DC transmission mode, and has a very strong economic benefits. Compared with AC GIL, the major technical difficulties and differences of DC GIL are insulation issues. Studies on DC GIL insulation issues are helpful to its operation, maintenance, and life prediction. Domestic and foreign researches on DC GIL are widely introduced from two aspects; the overall insulation design and internal partial discharge detection. It can provide a better cognition and reference for further study on DC GIL insulation problems.

**Key words:** gas insulated line; direct current; insulation design; partial discharge

(编辑 钱悦)