

DOI: 10.7667/PSPC152004

考虑集电网结构的海上风电场谐振研究

段庚勇, 冯琳, 李国杰

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 海上风力发电已经成为风电领域的重要发展方向。海上风电场中大量应用海底电缆进行电力传输, 其较高的对地电容使得风电场的谐振问题更加突出。风电场集电网结构决定了电缆的长度、电气参数与连接方式, 直接影响系统的谐振频率与强度。建立了海上风电场电力传输系统的谐波模型, 包括风电机组、电缆与变压器模型等。基于模态分析方法, 对不同集电网结构下系统的谐振情况进行了仿真计算, 并由各节点参与因子分析谐振的主要来源; 采用元件参数灵敏度分析方法, 评估了主要结构参数对谐振的影响程度; 进而针对不同频段谐振给出滤波措施。仿真结果验证了谐振抑制的有效性。

关键词: 海上风电场; 谐振; 集电网结构; 模态分析; 灵敏度; 电缆

Research on resonance of offshore wind farm considering electricity collection system

DUAN Gengyong, FENG Lin, LI Guojie

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The offshore wind power is becoming an important development direction in the field of wind generation. In offshore wind farm, submarine cables are widely used to transmit power, which makes the resonance problem more serious due to the cables' high grounding capacitor. The power collecting system determines the cables' length, electric parameter and connection type, which directly affects the resonance frequency and impedance. This paper builds the resonance model of offshore wind farm transmission system, including wind generators, cables and transformers. Using modal analysis method, the resonance situations under different power collecting systems are simulated and calculated. The key nodes causing resonance are located by the participation factor. The main parameters' influence on resonance is evaluated with parameter sensitivity analysis. Finally, the filtering solution is proposed for different resonance frequency, which is proved to be effective by simulation results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477098 and No. 51307106).

Key words: offshore wind farm; resonance; collection system structure; modal analysis; sensitivity; cables

0 引言

海上风能资源丰富, 发电量大, 且不占用陆上土地, 海上风力发电已经成为风电领域的重要发展方向。截止2014年12月, 全球海上风电装机容量已达8759 MW, 约占风电装机总容量的2.4%^[1]。随着海上风电的快速发展, 其并网产生的谐波对电网系统的安全稳定必然造成威胁。海上风电传输系统中大量应用高容性的海底电缆, 当电缆与变压器

等感性元件相连时, 极易发生并联谐振。一旦风电机组输出的谐波在传输系统中产生谐波谐振, 则会引发过电压、过电流导致元件过热损耗, 严重时导致绝缘失败, 甚至引发严重的电力事故。

一般海上风电场的传输系统包括集电网、海上升压站、高压传输电缆及岸上换流站。文献[2]建立了海上风电场主要元件的谐波模型, 主要分析了双馈异步发电机与变流器对谐振的影响。文献[3]分析了海上风电场中变压器的绕组设计对海上风电场通电瞬间的谐振过电压的机理及影响程度, 并进行了实物验证。文献[4]利用传统频谱分析方法, 研究了海上风电场变流器对谐振的影响程度, 并设计了基于主动阻尼控制策略的陷波滤波器用于滤除谐波。

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2015BAA01B02); 国家自然科学基金项目(51477098); 国家自然科学基金项目(51307106)

目前针对海上风电场谐振的研究主要关注在风力发电机、变流器及变压器上，缺乏对集电网拓扑的考虑。实际上海上风电场集电网拓扑决定了电缆的长度、电气参数与连接方式，直接影响系统的谐振频率与强度，在对海上风电场谐振的研究中不应忽视。

当前海上风电场谐振研究主要采用频谱分析法^[5]，但该方法检测速度慢，且只能提供总体谐振阻抗及频率信息。文献^[6]提出了模态分析法，该方法通过分析系统导纳矩阵特征根的性质，可以得到有关谐振机理和程度的详细信息。模态方法在电力系统中主要应用于电力系统振荡^[7]、电压稳定性分析^[8]，以及微网^[9]和运动负荷牵引电网^[10]中的谐振研究。文献^[11]将模态方法应用于海上风电场的谐振分析，但未涉及到对集电网拓扑的考虑。

针对集电网拓扑，文献^[12]提出了包括链形、环形、星形在内的五种拓扑形式。文献^[13]针对内部损耗、经济性等指标对多种拓扑结构进行了比较。文献^[14]评估了多种拓扑结构的投资成本、故障机会成本，并提出在典型参数下，传统的链形拓扑有明显的成本优势。而当故障率过高时，复合环形拓扑有更高的经济性。当前针对集电网拓扑的研究主要集中在经济性、可靠性等方面，缺乏其对海上风电场谐振影响的研究。

本文根据丹麦 Horns Rev2 海上风电场的实际结构和参数，分别建立了集电网为链形拓扑和环形拓扑下的海上风电场传输系统的谐波模型。之后求取系统导纳矩阵，利用模态分析方法，对两种模型的全局谐振点及各节点参与程度进行了计算分析，从而确定在不同拓扑下谐振的关键参与节点。进而采用模态灵敏度方法，确定在两种拓扑下对谐振影响最大的参与元件。最终根据以上结果，提出谐振的抑制措施并验证。

1 海上风电场集电网常用结构

目前世界范围内的海上风电场大多数为交流输电方式。完整的海上风电场电气系统通常可分为四部分，集电网、海上升压站、高压电缆以及岸上换流站^[15]。其中集电网可以根据风电场的规模、离岸距离、可靠性等因素设计为不同的拓扑结构。海上风电场常用的集电网拓扑有链形、星形、环形等。

集电网拓扑不但影响风电场的成本与经济性，电缆长度、电气参数以及元件的连接关系的变化，也会对谐振造成比较大的影响，从而影响风电场与相连电网的可靠性。

1.1 链形拓扑

如图 1 所示，若干风力发电机通过集电缆连接，

形成一条链，称为“集电链”。之后多条集电链馈送到汇流母线处。该拓扑优点是操作简单，成本较低；缺点是可靠性不高，一旦电缆某处发生故障，则整条电缆都将切除。采用此拓扑的海上风电场较多^[16]，有丹麦 Horns Rev2 风电场等。

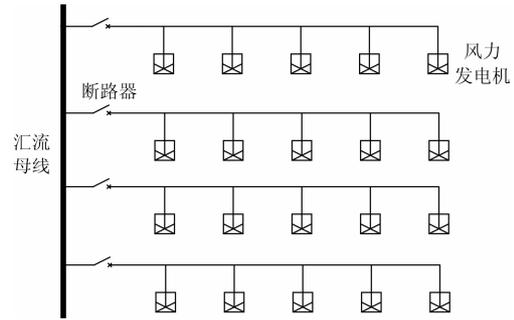


图 1 海上风电场集电网链形拓扑

Fig. 1 Chain topology of offshore wind farm collection system

1.2 星形拓扑

如图 2 所示，每台风力发电机都通过较短电缆连接至局部汇流点，之后再输送到汇流母线处。该拓扑优点是可靠性高，且可降低电缆功率等级。但因为需要更多的断路器、隔离开关等器件，所以成本过高，目前实际风场采用此拓扑的很少。

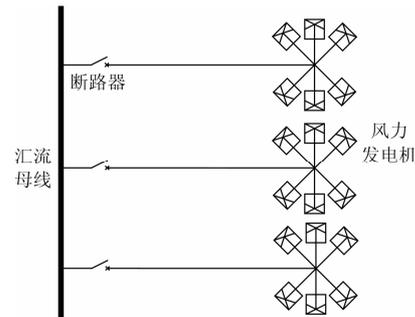


图 2 海上风电场集电网星形拓扑

Fig. 2 Star topology of offshore wind farm collection system

1.3 环形拓扑

如图 3 所示，在链形拓扑的基础上，经一条冗余的电缆将两条相邻集电链的末端相连，此时集电链电缆的输送功率加倍。该布局优点是提高了可靠性，缺点是操作比较复杂，成本较高。丹麦 Horns Rev1 风电场采用了此拓扑。

2 模态分析方法

2.1 模态分析法原理

传统的谐振分析方法有频域分析法和时域仿真法。频域分析法通过测算系统所有节点的阻抗频谱来发现潜在的谐振点，简单、直观、速度快，是

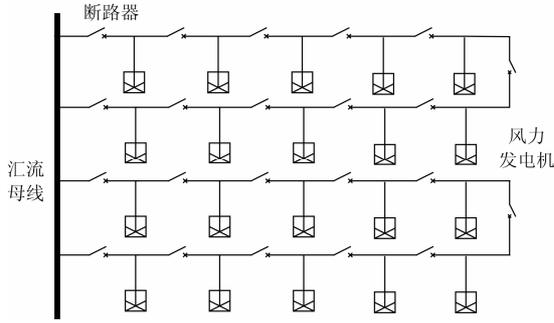


图3 海上风电场集电网环形拓扑

Fig. 3 Circular topology of offshore wind farm collection system

常用的谐振分析方法, 但缺点是提供的信息过少, 只能提供总体谐振阻抗及频率信息。时域仿真法分析的结果准确性更高, 但存在仿真耗时长的问题^[17]。以上两种方法都难以量化谐振中各网络元素的影响。

模态分析法的基本思想是: “对于任何一个电力系统, 其并联谐振的产生必然是因为其网络导纳矩阵 \mathbf{Y} 的逆矩阵出现数值很大的元素”^[6]。假设系统在频率 f 产生并联谐振, 则表示通过式(1)计算出的电压向量中某些元素对应频率 f 有很大的值。

$$\mathbf{V}_f = \mathbf{Y}_f^{-1} \mathbf{I}_f \quad (1)$$

式中, \mathbf{V}_f 、 \mathbf{I}_f 分别为节点电压、节点注入电流矩阵。为简化符号, 以下将省略下标 f 。

式(1)可以分解为式(2)形式^[18]。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{L} \mathbf{A} \mathbf{T} \quad (2)$$

式中: \mathbf{A} 为对角特征值矩阵; \mathbf{L} 、 \mathbf{T} 分别为左、右特征向量矩阵。将式(2)代入式(1)得

$$\mathbf{T} \mathbf{V} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{T} \mathbf{I} \quad (3)$$

定义 $\mathbf{U} = \mathbf{T} \mathbf{V}$ 为模态电压向量, $\mathbf{J} = \mathbf{T} \mathbf{I}$ 为模态电流向量。假设当 \mathbf{A}^{-1} 中的元素 λ_i^{-1} 非常大时, 则很小的模态 i 电流 J_i 就会导致很大的模态 i 电压 U_i 。而其他的模态电压将不受影响, 因为它们和模态 i 电流之间没有耦合。此时节点 k 的电压可以表示为

$$v_k = \lambda_i^{-1} \sum_{m=1}^n l_{ki} t_{im} i_m \quad (4)$$

式中: l_{ki} 和 t_{im} 分别为特征值为 λ_i^{-1} 的左、右特征向量中的元素; i_m 为第 m 节点的电流。说明关键特征向量中的对应元素描述了节点电压、节点电流和特征值之间的关系, 即关键谐振的影响范围, v_k 称为“参与因子”^[19]。参与因子的物理意义是, 在所有节点中注入相同幅度的谐波电流, 则在参与因子较高的节点中引发的谐波谐振危害较严重, 称这些节点为“关键节点”。同时, 某次谐振若由多个节点共同引起, 则关键节点对该次谐振的产生贡献较大。

由此可以预判受谐振影响较大的节点, 并且有针对性在特定节点采取谐振抑制措施。

2.2 元件参数灵敏度分析

由于连接于同一关键节点有多个元件, 为了使元件调整达到最大抑制谐振的效果, 需要找出对谐振影响最大的元件, 称为“关键元件”。采用元件参数灵敏度分析可以量化海上风电场中各参数对谐振强度的影响大小。根据文献[20], 并联元件导纳为 $Y = G + jB$, 谐振阻抗对其灵敏度表达式如下:

$$\frac{\partial |\lambda|}{\partial G} = \frac{d|\lambda|}{dF} \frac{\partial F}{\partial G} = \frac{S_r \lambda_r + S_i \lambda_i}{\sqrt{\lambda_r^2 + \lambda_i^2}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial |\lambda|}{\partial B} = \frac{d|\lambda|}{dF} \frac{\partial F}{\partial B} = \frac{S_r \lambda_r - S_i \lambda_i}{\sqrt{\lambda_r^2 + \lambda_i^2}} \quad (6)$$

式中: λ_r 与 λ_i 分别为第 k 个特征值 λ_k 的实部与虚部; S_r 与 S_i 分别为特征值对元件所在节点 Y_{ij} 的灵敏度 $S_{\lambda,ij}$ 的实部与虚部。

对于串联元件, 因为其习惯用阻抗 $Z = R + jX$ 而不是导纳来代表, 所以假定 $\frac{\partial |\lambda|}{\partial G} = \mu$, $\frac{\partial |\lambda|}{\partial B} = \nu$, 则有

$$\frac{\partial |\lambda|}{\partial R} = \frac{\mu(X^2 - R^2) + 2\nu RX}{(R^2 + X^2)} \quad (7)$$

$$\frac{\partial |\lambda|}{\partial X} = \frac{\nu(X^2 - R^2) - 2\mu RX}{(R^2 + X^2)} \quad (8)$$

该灵敏度值反映了实际元件与谐振阻抗的绝对关系, 但为了使多种参数能够互相比, 揭示其相对影响程度, 设元件参数为 α , 定义归一化灵敏度如下:

$$\left. \frac{\partial |\lambda|}{\partial \alpha} \right|_{\text{norm}} = \frac{\frac{\partial |\lambda|}{\lambda}}{\frac{\partial \alpha}{\alpha}} = \frac{\partial |\lambda|}{\partial \alpha} \cdot \frac{\alpha}{\lambda} \quad (9)$$

式中, $\frac{\partial |\lambda|}{\lambda}$ 和 $\frac{\partial \alpha}{\alpha}$ 分别表示谐振阻抗值和元件参数的相对变化。该指标表征不同元件的值在改变相同百分比时, 谐振阻抗的变化百分比, 这使得灵敏度分析在元件之间更具有可比性, 从而揭示某节点的关键元件。

3 海上风电场模型

丹麦 Horns Rev2 海上风电场的结构如图4所示^[21]。风电机组经变压器升压至 35 kV, 之后进入集电网系统通过小容量中压集电缆, 后通过大容量

中压集电缆经汇流母线连接至海上升压站,在此升压至 150 kV 后通过高压电缆输送至岸上换流站,之后并入岸上电网。为进行无功补偿或滤除谐波,在合适节点处设置电容器组或滤波装置。应用模态分析法的前提是得到系统的网络导纳矩阵,因此需要建立系统中各元件的谐波模型。

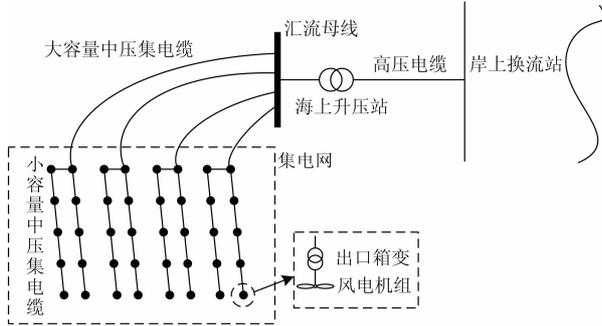


图 4 丹麦 Horns Rev2 海上风电场的结构

Fig. 4 Structure of Denmark Horns Rev2 offshore wind farm

3.1 风电机组谐波模型

单台风电机组由风力发电机、变流器、LCL 滤波器三部分组成^[22],是风电场的主要谐波源。因为本文主要研究风场传输系统的谐振情况,所以忽略风力发电机与变流器内部结构,以含有谐波的理想电压源表示风力发电机模型^[23],同时保留 LCL 滤波器,如图 5 所示。

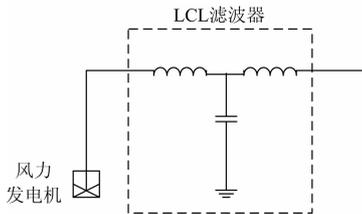


图 5 风电机组谐波模型

Fig. 5 Harmonic model of wind turbine

3.2 变压器谐波模型

海上风电场中包含两种变压器,分别为风电机组出口处的 0.69/35 kV 箱式升压变压器(下文简称“风机出口箱变”)和汇流母线处的 35/150 kV 海上升压变压器(下文简称“主变”)。变压器谐波模型建模有多种方法,其主要特性为谐波电阻随频率的升高而显著增高,电感随频率升高逐渐下降^[24-27]。目前公认比较准确的变压器模型为 CIGRE 标准谐波模型^[28],该模型将绕组导线中占主导作用的涡流损耗近似与频率平方成正比,并考虑了去磁效应,能够精确地反映变压器的实际工作状况,等值电路如图 6 所示。

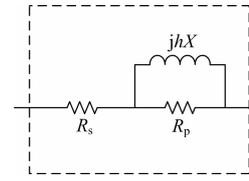


图 6 风电机组谐波模型

Fig. 6 Harmonic model of transformer

图中, X 为 50 Hz 时的变压器漏抗, h 表示谐波次数, R_s 表示导线绕组电阻, R_p 表示导线绕组的涡流损耗,且 R_s 和 R_p 值不随频率改变,其计算公式如式(10)、式(11)。

$$R_s = \frac{X}{\tan \phi} \quad (10)$$

$$R_p = 10X \tan \phi \quad (11)$$

式中: $\tan \phi = e^{0.693+0.796 \ln S - 0.042 (\ln S)^2}$; S 为变压器的额定功率。

3.3 海底电缆谐波模型

由文献[29]可知,在谐振研究的频域等值计算中,单位长度的海底电缆可以等效为集中参数 π 模型,考虑到海底电缆的长线效应,需要采用分布参数模型^[30],计算过程见式(12)~式(15)。

$$Z_c = \sqrt{(R_0 + jhL_0) / jhC_0} \quad (12)$$

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + jhL_0) jhC_0} \quad (13)$$

$$Z = Z_c \sinh(\gamma l) = R + jhL \quad (14)$$

$$Y = \frac{2(\cosh \gamma l - 1)}{Z_c \sinh \gamma l} = jhC \quad (15)$$

由此建立了海底电缆的等效电路,如图 7 所示。

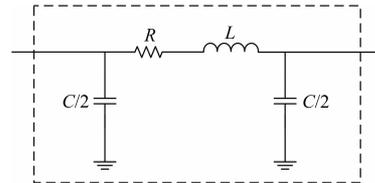


图 7 海底电缆谐波模型

Fig. 7 Harmonic model of submarine cable

4 风电场谐振分析

4.1 仿真实例模型

由丹麦 Horns Rev2 海上风电场的设计资料^[21],可知其实际选用的各组件物理参数,如风电机组额定容量、电压、电流,电缆导体介质、截面积、长度,变压器容量、漏抗等。将参数代入上节各元件的谐波模型,可得出相应的电气参数,从而建立本文所用海上风电场系统实例的仿真谐波模型,元

件参数见表 1, 均已折算到 150 kV 电压等级。其中因为集电网为对称结构, 所以简化为 4 条集电网, 不影响仿真结果的有效性。

表 1 海上风电场谐波模型参数

Table 1 Parameters of offshore wind farm resonance model			
元件	符号	参数值	
链形拓扑			
LCL 滤波器	网侧电感	L_{f1}	182.38 mH
	变流器侧电感	L_{f2}	362.04 mH
	电容	C_{f1}	0.012 1 μ F
风机出口箱变 (0.69/35 kV)	导线绕组电阻	R_{s1}	1.335 Ω
	涡流损耗电阻	R_{p1}	4 848.4 Ω
	漏感	L_{t1}	80.7 mH
小容量中压集电缆	电阻	R_{cable1}	0.125 Ω /km
	电感	L_{cable1}	0.38 mH/km
	电容	C_{cable1}	0.105 μ F/km
大容量中压集电缆	电阻	R_{cable2}	0.046 9 Ω /km
	电感	L_{cable2}	0.32 mH/km
	电容	C_{cable2}	0.31 μ F/km
海上升压站主变 (36/150 kV)	导线绕组电阻	R_{s2}	0.749 Ω
	涡流损耗电阻	R_{p2}	207.244 Ω
	漏感	L_{t2}	12.5 mH
150 kV 高压电缆	电阻	R_{cable3}	0.001 27 Ω /km
	电感	L_{cable3}	0.094 9 mH/km
	电容	C_{cable3}	1.823 μ F/km
环形拓扑			
大容量中压集电缆	电阻	R_{cable2}	0.046 9 Ω /km
	电感	L_{cable2}	0.32 mH/km
	电容	C_{cable2}	0.31 μ F/km
(其余部分与链形拓扑相同)			

为研究集电网拓扑对谐振的影响, 分别建立两种拓扑下的仿真模型, 如图 8 与图 9。其中图 8 为链形拓扑的完整仿真结构图, 图中数字表示节点号。图 9 为了清楚表示环形拓扑与链形拓扑的区别, 主要突出增加了冗余电缆, 同时因为环形拓扑下集电网功率翻倍, 因此全部更改为大容量中压集电网, 其余部分与链形拓扑相同, 节点位置亦无更改。

4.2 集电网拓扑对谐振的影响

海上风电场的集电网拓扑变化将改变系统元件之间的连接关系, 同时影响元件的参数大小, 如电缆的功率。分别对系统在链形与环形拓扑下的谐振情况进行模态分析, 可得到其模态阻抗随频率变化的曲线, 如图 10 所示, 谐振点频率见表 2, 谐振点阻抗见表 3。根据多个风电场的实测数据^[31-34], 风电机组产生的主要谐波次数为 5、7、11、13、17、19、23 等奇次谐波。由图 10 可知该系统的主要谐振次数接近于 7、17 及 19 次, 因此极易形成谐波谐振, 给风电场的运行与并网电能质量造成不良影响。

以下将通过各节点的参与因子分析其对谐振的影响程度。由于系统中存在众多位置对称的节点, 它们的参与因子基本相同, 因此选取以下典型位置的节点。节点 1 代表 LCL 滤波器中间连接点, 节点 2 代表风机出口箱变与小容量中压集电网的连接点, 节点 41 代表大容量中压集电网与主变的连接点, 节点 42 代表主变与高压电缆的连接点。图 11~图 13 为在三个谐振频次下, 各代表节点的参与因子比较。

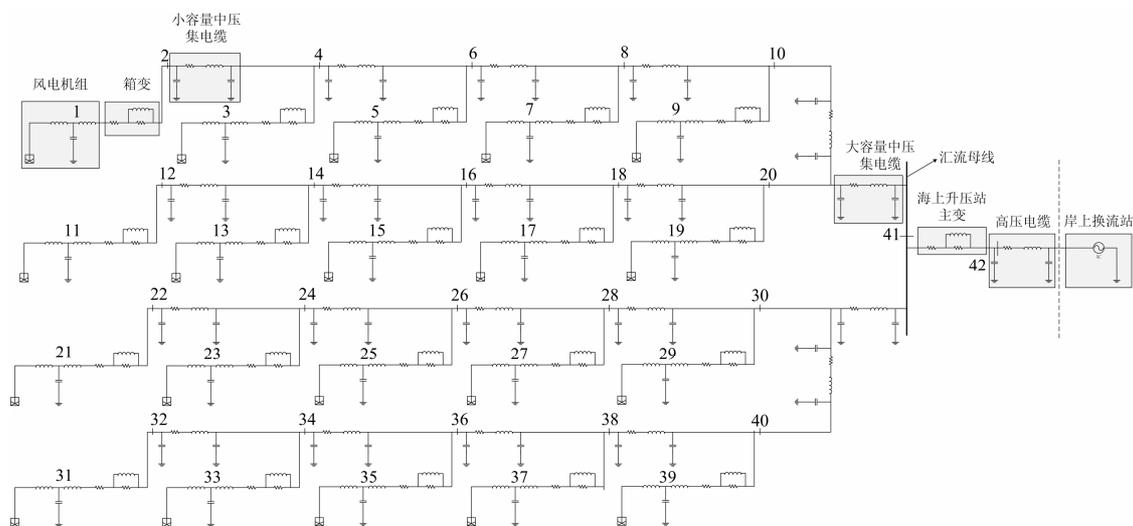


图 8 海上风电场链形拓扑谐波模型

Fig. 8 Model of offshore wind farm system in chain topology

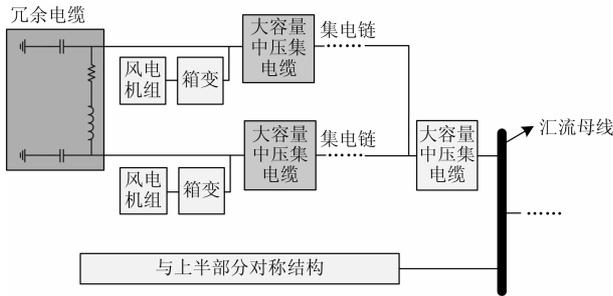


图 9 海上风电场环形拓扑谐波模型

Fig. 9 Model of offshore wind farm system in circular topology

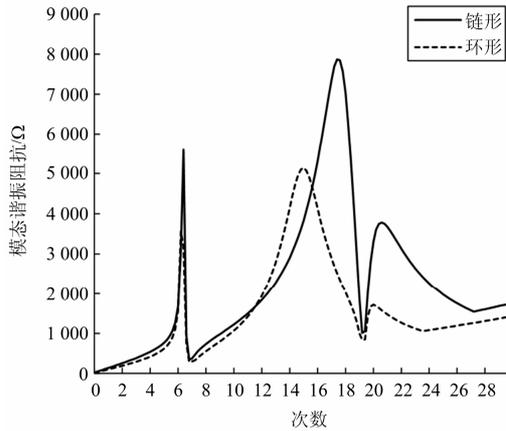


图 10 海上风电场的模态阻抗

Fig. 10 Modal impedance of offshore wind farm

表 2 海上风电场的模态谐振次数

Table 2 Modal harmonic resonance order of offshore

wind farm system

拓扑类型	低频(次)	中频(次)	高频(次)
链形	6.6	17.6	20.8
环形	6.4	15.2	20.2

表 3 海上风电场的模态谐振阻抗

Table 3 Modal harmonic resonance impedance of offshore

wind farm system

拓扑类型	低频/Ω	中频/Ω	高频/Ω
链形	5 590	7 871	3 783
环形	3 567	5 141	1 718

由图 10 和表 2、表 3 可以看出，两种拓扑都产生了三个频次谐振，但其频率和阻抗各有不同，其变化主要原因是参与因子高的各节点的结构变化。

在低频段，链形与环形拓扑下的谐振频率相差不大，谐振阻抗差别较大，其参与因子见图 11。低频段的最主要参与节点是 42，为高压电缆与主变的连接点，拓扑的改变不引起该节点的变化。阻抗值

的变化是因为拓扑改变后，电缆的截面积要适应容量的改变，从而影响了电阻值。

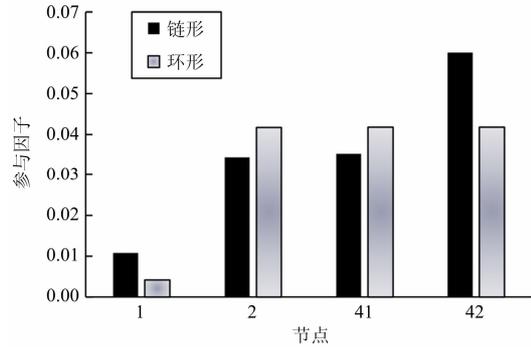


图 11 低频谐振，两拓扑下关键节点的参与因子

Fig. 11 Participant factors of two topologies' key nodes in low-frequency resonance

在中频段，链形与环形的谐振频率相差较大，参与因子见图 12。可以看到，中频段的最主要参与节点为 2 和 41。在链形拓扑中，每条集电链直接连接至汇流母线。而在环形拓扑中，两条集电链的尾端须通过冗余电缆连接，该电缆的容量为两条集电链所连风力发电机容量之和，所以其对地电容大于链形拓扑中的集电链，且两条集电链形成并联关系同样会增大对地电容。根据公式 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，其谐振频率自然减小。

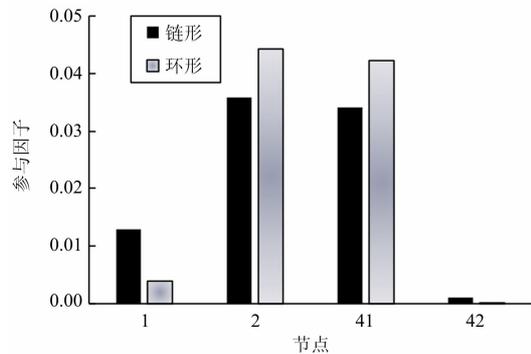


图 12 中频谐振，两拓扑下关键节点的参与因子

Fig. 12 Participant factors of two topologies' key nodes in middle-frequency resonance

在高频段，两个拓扑下谐振频率相比于中频段接近，而环形谐振阻抗依然远低于链形，其参与因子见图 13。原因是在环形拓扑下，节点 42 在高频段的参与因子要远大于中频段，因此高压电缆起到了更大的影响作用，因此使得两拓扑下的谐振频率趋近。但由于环形拓扑下整体电缆阻抗值偏小，因此谐振阻抗依然小于链形。

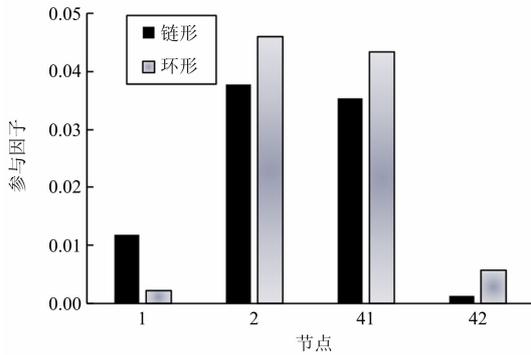


图 13 高频谐振, 两拓扑下关键节点的参与因子
Fig. 13 Participant factors of two topologies' key nodes in high-frequency resonance

4.3 针对谐振的元件参数灵敏度分析

由参与因子可得出谐振关键节点, 而在连接在同一关键节点的多个元件中, 灵敏度分析可以进一步揭示影响谐振的关键元件。对海上风电场的关键元件参数进行灵敏度分析, 可以得到如图 14~图 16 的三个谐振频段的灵敏度指标, 正负号表示正负相关, 数值表示影响强弱。其中 R_{s1} 、 R_{p1} 、 L_{t1} 与 R_{s2} 、 R_{p2} 、 L_{t2} 分别代表风机出口箱变与主变的导线绕组电阻、涡流损耗电阻与漏感, $R_{cable1-3}$ 、 $L_{cable1-3}$ 与 $C_{cable1-3}$ 代表三种电缆的电阻、电感与电容, 分别是小容量中压集电缆、大容量中压集电缆以及高压电缆。

显而易见, 系统的关键节点为 2、41、42, 它们连接的元件参数的灵敏度各有区别。低频段受到高压电缆的正向影响最大, 远远超出其他参数, 由前文参与因子分析也可给出解释, 因为低频谐振主要由高压电缆引起。中频段两拓扑的区别较大, 且链形拓扑受参数影响均要大于环形拓扑, 同时主变的电阻对两拓扑都具有相当大的正向影响。高频段的主要影响参数与中频段相同, 而此时环形拓扑受到的影响要大于链形。

需要注意的是, 除高压电缆外, 其他电缆的主要影响成分均为电容。高压电缆由于其对地电容及长度都显著高于其他电缆, 所以其电感与电容都会对谐振影响较大。为减小低频谐振, 应尽量减小高压电缆电感与电容值。而对于中频谐振, 减小高压电缆电感电容值, 反而会增大谐振强度, 所以为消除中频谐振应主要增大主变电感。因此, 在风电场设计之初就应对各参数的灵敏度加以分析, 在选取电缆和变压器时避开敏感区域。

由此可见, 在利用参与因子确定关键节点的前提下, 元件参数灵敏度可以从该节点连接的多个元

件中进一步定位关键元件, 从而更彻底地揭示谐振的激励源。

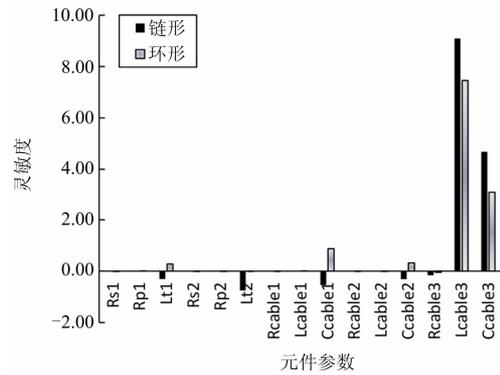


图 14 低频谐振, 两拓扑下各元件参数的灵敏度
Fig. 14 Parameter sensitivity of two topologies' elements in low-frequency resonance

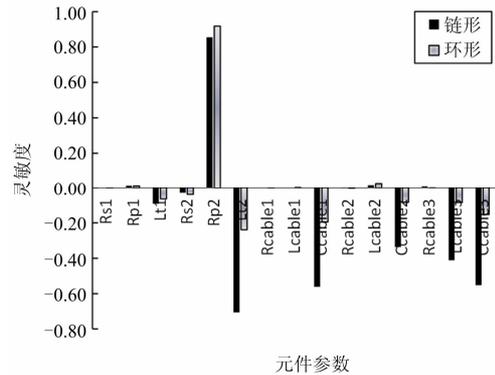


图 15 中频谐振, 两拓扑下各元件参数的灵敏度
Fig. 15 Parameter sensitivity of two topologies' elements in middle-frequency resonance

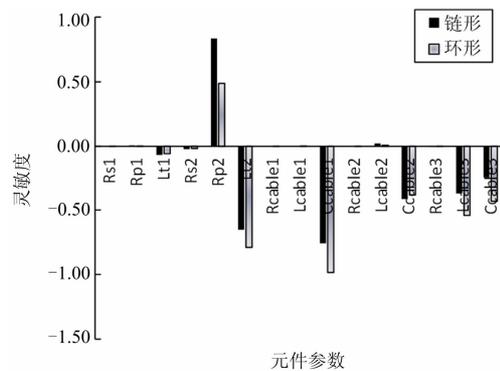


图 16 高频谐振, 两拓扑下各元件参数的灵敏度
Fig. 16 Parameter sensitivity of two topologies' elements in high-frequency resonance

5 海上风电场谐振抑制措施

风电场传输系统产生的谐振引起谐波放大, 会

对电力系统造成严重的危害，因此对谐振抑制措施的研究是非常必要的^[35]。谐振抑制可以分为两个阶段，第一阶段为设计之初就对风场进行全面的仿真分析，调整元件参数，使系统谐振频率避开风力发电机自身产生谐波的频率。本文的元件参数灵敏度分析可以为前期设计提供依据。第二阶段为在已建成投入运行的风电场中，因无法针对系统参数做出调整，需要额外加装滤波装置。

无源滤波器是目前广泛采用的滤波装置，其结构简单，可靠性较高，运行费用低，而且可以兼顾无功补偿^[36]。无源滤波器类型以单调谐、高通滤波器为主。单调谐滤波器主要用于滤除低次谐波，高通滤波器用于滤除高次谐波。根据风场存在的谐波情况，一般无源滤波装置由数个单调谐滤波器和一个高通滤波器组成，可以在最大程度上滤除谐波。滤波器模型如图 17 所示。

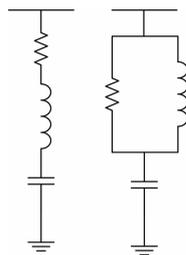


图 17 单调谐滤波器(左)与高通滤波器(右)模型
Fig. 17 Model of single tuned filter (left) and high-pass filter (right)

以链形为例。低频谐振次数 6.4 次，主要参与节点为 42。中频和高频谐振次数分别为 17.6 与 20.8 次，主要参与节点为 2 和 41。根据文献^[37]，风力发电机产生的主要谐波为 5、7、11、13、17、19 次，且限定在低于 69 kV 的风场汇流点中电压畸变率不得超过 3%，所以该风场的传输系统有引起谐波谐振的风险。针对低频谐振在节点 42 处加装 5、7 次单调谐滤波器。针对中高频谐振，因为节点 41 为风场汇流点，在此节点加装滤波器的效果要好于节点 2，所以在节点 41 处加装 17 次高通滤波器。仿真结果如图 18 所示，可见滤波器消除了原有的谐振点，并使谐振次数变为 3 次，此时可以采用变压器的 Y/△接法抑制 3 次谐波，基本解决了谐振问题。

为验证谐振抑制效果，在风力发电机出口处注入实际情况下的风力发电机输出电流，其中各次谐波电流大小符合 German Electricity Association 对于风力发电机变流器输出谐波电流的限值^[38]，即该风电场在实际情况下所能达到的最大谐波电流，可反应最坏情况下的结果。利用 PSCAD 进行仿真验证，

测量节点 41、42 处的电压，使用 FFT 变换绘制其电压频谱，并计算在加装滤波器前后的电压畸变率，如图 19 与图 20 所示。图中横轴为次数，纵轴为谐波电压占比。可以看到，通过加装滤波器，各次谐波都得到了有效抑制，且电压畸变率由 2.96%降低到了 0.25%，符合要求。

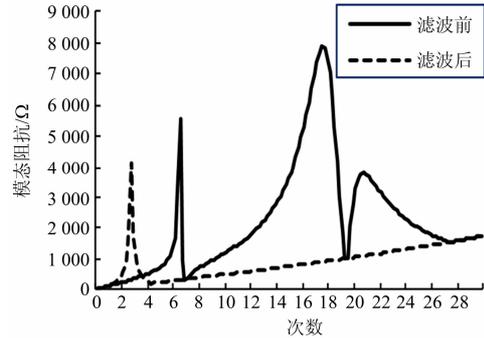


图 18 加入滤波器前后的谐振情况

Fig. 18 Modal resonance impedance comparison before and after adding filters

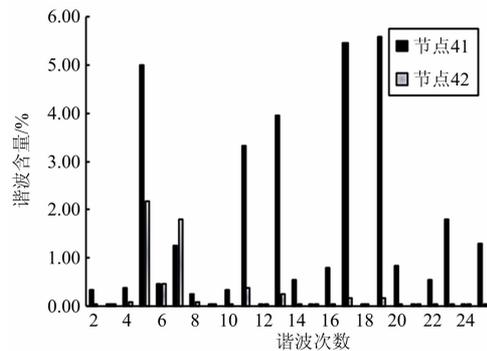


图 19 加入滤波器前，节点 41 与 42 的电压频谱
Fig. 19 Before setting filters, the voltage spectrum of node 41 and 42

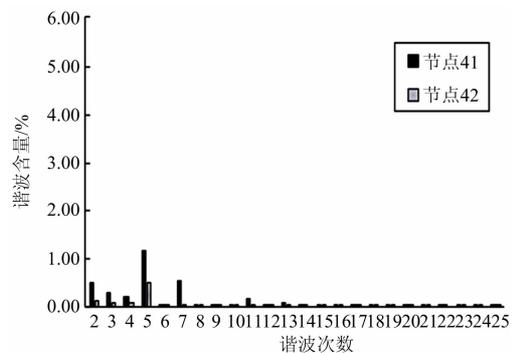


图 20 加入滤波器后，节点 41 与 42 的电压频谱
Fig. 20 After setting filters, the voltage spectrum of node 41 and 42

虽然无源滤波器的谐波抑制效果显著，但仍然具有一定缺点，即在消除原有谐振点后，引入了新

的谐振点, 需要注意在设计滤波器参数时避开风场自身谐波次数。

6 结语

本文根据丹麦 Horns Rev2 海上风电场的实际参数建立了仿真谐波模型, 利用模态分析和元件参数灵敏度分析, 对集电网拓扑、各元件的电阻、电感与电容参数对海上风电场谐振的影响进行了分析。文中, 根据参与因子确定激发谐振的关键节点, 并探讨了在链形与环形拓扑下谐振激发机理的区别。通过元件参数灵敏度分析, 确定了激励谐振的关键元件, 同时也分析了集电网拓扑因素导致的关键元件的变化。最后, 在关键节点处, 加装无源滤波器, 通过仿真验证了其对于谐波抑制的有效性。可以得到以下结论:

(1) 采用模态分析和元件灵敏度分析结合的方法, 可以分析海上风电场谐振情况, 确定谐振激发的关键节点, 并进一步定位关键元件, 从而为海上风电场的前期拓扑设计提供参考, 为已建成风电场的谐振分析与消除提供理论依据。

(2) 海上风电场集电网拓扑对于谐振有明显影响, 主要在于结构变化改变了电缆连接关系、长度及电气参数, 从而影响谐振频率和谐振强度。总体来说, 环形拓扑下由于其电缆容量高, 导致电缆阻抗较小, 在同样的风电场布局下, 其谐振强度低于链形拓扑。在海上风电场拓扑设计时不仅应考虑成本等因素, 也应对其谐振情况予以分析与综合考量。

(3) 本文使用前述方法, 基于各谐振频段下节点的参与因子, 在关键节点处设计滤波器滤波方案, 仿真结果表明对谐振抑制效果明显, 但应避免引入与风场自身谐波次数相近的新谐振点。

(4) 本文为海上风电场的谐振问题提供了较为完整的分析方法, 可以针对谐振抑制方面, 在海上风电场设计提供参数调整依据, 并为解决已建成海上风电场谐波问题, 加装滤波设备提供安装位置及参数建议。

参考文献

- [1] GWEC. 2014 年全球风电装机容量统计[J]. 风能, 2015(2): 50-53.
GWEC. The 2014 global wind power statistical data[J]. Wind Power, 2015(2): 50-53.
- [2] KING R, EKANAYAKE J. Harmonic modelling of offshore wind farm[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1-6.
- [3] SOLOOT A H, HOIDALEN H K, GUSTAVSEN B. The effect of winding design on transformer frequency response with application on offshore wind farm energization[C] // Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012: 1-5.
- [4] JIANG S, ZHANG S, LU X, et al. Resonance issues and active damping in HVAC grid-connected offshore wind farm[C] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013: 210-215.
- [5] ZUBIAGA M, ABAD G, BARRENA J, et al. Spectral analysis of a transmission system based on AC submarine cables for an offshore wind farm[C] // Industrial Electronics, 2009: 871-876.
- [6] 徐文远, 张大海. 基于模态分析的谐波谐振评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 89-93.
XU Wenyuan, ZHANG Dahai. A modal analysis method for harmonic resonance assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 89-93.
- [7] 王宇静, 于继来. 电力系统振荡模态的矩阵束辨识法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 12-17.
WANG Yujing, YU Jilai. Matrix pencil method of oscillation modes identification in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 12-17.
- [8] 李增国, 王锐, 邢卫荣. 基于连续潮流和模态分析的电压稳定分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(9): 81-84.
LI Zengguo, WANG Rui, XING Weirong. Voltage stability analysis based on continuation power flow and modal analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 81-84.
- [9] 雷之力, 艾欣, 崔明勇, 等. 基于模态评估法的微网串联谐振仿真[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(1): 178-184.
LEI Zhili, AI Xin, CUI Mingyong, et al. Simulation on series harmonic resonance of microgrid based on modal assessment method[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(1): 178-184.
- [10] 徐志强, 李冰, 周田华, 等. 基于模态分析的运动负荷牵引电网谐波谐振分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 76-80.
XU Zhiqiang, LI Bing, ZHOU Tianhua, et al. Harmonic resonance assessment of traction system with moving load based on modal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 76-80.
- [11] ZUBIAGA M, ABAD G, BARRENA J, et al. Evaluation of the frequency response of AC transmission based offshore wind farms[M]. INTECH Open Access Publisher, 2011.

- [12] 黄玲玲, 符杨, 郭晓明. 大型海上风电场电气接线方案优化研究[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 77-81.
HUANG Lingling, FU Yang, GUO Xiaoming. Research on optimization of electrical connection scheme for a large offshore wind farm[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 77-81.
- [13] 孙君洋, 朱淼, 高强, 等. 大型海上交流风电场内部拓扑优化设计[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1978-1982.
SUN Junyang, ZHU Miao, GAO Qiang, et al. Optimal design of internal topology for high power AC offshore wind farm[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1978-1982.
- [14] 王建东, 李国杰. 海上风电场内部电气系统布局经济性对比[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 99-103.
WANG Jiandong, LI Guojie. Economic comparison of different collector networks for offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 99-103.
- [15] 黄玲玲, 曹家麟, 符杨. 海上风电场电气系统现状分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 147-154.
HUANG Lingling, CAO Jialin, FU Yang. Review of electrical systems for offshore wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 147-154.
- [16] 严干贵, 孙兆键, 穆钢, 等. 面向集电系统电压调节的风电场无功电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 140-146.
YAN Gangui, SUN Zhaojian, MU Gang, et al. Collector system voltage regulation oriented reactive power control strategy for wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 140-146.
- [17] 徐英. 电力系统暂态稳定时域仿真的 Taylor 级数算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
XU Ying. Research on Taylor series algorithm of numerical simulation for power system transient stability[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [18] BELLMAN R. Introduction to matrix analysis[M]. McGraw-Hill, 1970.
- [19] 刘书铭, 李陈莹, 李琼林, 等. 电力系统串联谐波谐振的特性分析与灵敏度计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 21-27.
LIU Shuming, LI Chenying, LI Qionglin, et al. Characteristic analysis of power system series harmonic resonance and sensitivity calculation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 21-27.
- [20] HUANG Z, CUI Y, XU W. Application of modal sensitivity for power system harmonic resonance analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 222-231.
- [21] ACKERMANN T. Transmission systems for offshore wind farms[J]. IEEE Power Engineering Review, 2003, 22(12): 23-27.
- [22] 侯睿, 武健, 徐殿国. 并联有源滤波器 LCL 滤波器特性分析及设计方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 191-198.
HOU Rui, WU Jian, XU Dianguo. Characteristics and design methods of LCL filter in shunt active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 191-198.
- [23] RAUMA K. Electrical resonances and harmonics in wind power plant[D]. Helsinki: Alto University, 2012.
- [24] 兰丽霞, 徐向军, 罗隆福. 新型换流变压器谐波损耗的计算与分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6): 36-40.
LAN Lixia, XU Xiangjun, LUO Longfu. Calculation and analysis of new type converting transformer's harmonic loss[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2011, 23(6): 36-40.
- [25] 王瑞珍, 刘丰, 于育民. 换流变压器谐波损耗频率特性测量方法研究[J]. 变压器, 2002, 39(1): 24-27.
WANG Ruizhen, LIU Feng, YU Yumin. Research on measuring method of frequency characteristic of harmonic losses in converting transformers[J]. Transformer, 2002, 39(1): 24-27.
- [26] HWANG M, GRADY W M, SANDERS J R H. Distribution transformer winding losses due to nonsinusoidal currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, PER-7(1): 140-146.
- [27] LI Pei, LI Guodong, XU Yonghai, et al. Methods comparison and simulation of transformer harmonic losses[C] // Power and Energy Engineering Conference, 2010: 1-4.
- [28] WU X, SADULLAH S, MATTHEWS B, et al. Nodal harmonic impedance derivation of AC network in PSS/E[C] // AC and DC Power Transmission, 2010: 2.
- [29] GUDMUNSDOTTIR U S. Modeling of long high voltage AC cables in transmission systems, Energinet. Dk, 2010[M].
- [30] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [31] 黄壮盛. 南澳风电场谐波的测量与分析[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 80-82.
HUANG Zhuangsheng. Measurement and analysis for

- harmonics generated by NanAo Wind Power Plants[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 80-82.
- [32] 刘路, 陈卫东, 刘鹏, 等. 广西首座风电场并网电能质量测量分析及对策研究[J]. 广西电力, 2012, 35(5): 1-4. LIU Lu, CHEN Weidong, LIU Peng, et al. Analysis and countermeasures on power quality measurement of first wind farm connection in Guangxi[J]. Guangxi Electric Power, 2012, 35(5): 1-4.
- [33] 韩冰, 刘媛媛, 韩峰. 坝上地区风电场谐波分析与评估[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(15): 4379-4383. HAN Bing, LIU Yuanyuan, HAN Feng. Harmonic assessment and analysis of wind power plants in the Dam Area[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(15): 4379-4383.
- [34] 曹健. 桂山风电场接入对珠海电网运行的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014. CAO Jian. Study on the influence of Guishan wind farm connecting to the Zhuhai power grid[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [35] 殷桂梁, 陈学琴, 马会艳, 等. 电网谐波条件下双馈风电系统输出特性分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 79-84. YIN Guilang, CHEN Xueqin, MA Huiyan, et al. Analysis and control of doubly-fed wind generation system's output characteristics under harmonic grid voltage conditions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 79-84.
- [36] 毕向阳, 朱凌. 无源滤波器的设计及仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(5): 22-25. BI Xiangyang, ZHU Ling. Studies on passive filter design and simulation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(5): 22-25.
- [37] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems[S]. IEEE Xplore, 1993: 1-112.
- [38] ROCKHILL A A, LISERRE M, TEODORESCU R, et al. Grid-filter design for a multimegawatt medium-voltage voltage-source inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1205-1217.

收稿日期: 2015-11-16; 修回日期: 2016-01-07

作者简介:

段庚勇(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为海上风电场建模及谐振研究; E-mail: duangengyong@163.com

冯琳(1976-), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电机设计与分析、智能电网; E-mail: fenglin@sjtu.edu.cn

李国杰(1965-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为新能源控制与接入、微电网分析与控制。E-mail: liguojie@sjtu.edu.cn

(魏小丽)