

海上风电场交流并网谐波谐振放大机理分析与治理

徐 政, 金砚秋, 李斯迅, 张哲任

(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 由于相同电压等级下电力电缆的电容效应比架空线路大出20倍以上,使得一般在陆上风电场并网中并不严重的谐波谐振放大问题,在海上风电场并网中可能会变得十分严重,为此研究了海上风电场并网引起的谐波谐振放大问题及其治理原理。首先,对海上风电场并网时的谐波谐振放大机理进行了分析,从原理上给出了治理的技术途径;然后,以某海上风电并网实际工程为研究案例,分别建立了海上风电电网和陆上电网的谐波模型,包括电缆、变压器和风电机组的谐波模型以及超高压大电网的等效谐波模型和低压配电网的等效谐波模型,并根据所建立的谐波模型分析了发生谐波谐振放大的原因,提出了解决谐波谐振放大问题的治理方案并进行了验算;最后,对海上风电场并网引起的谐波谐振放大问题的机理和治理原理进行了总结。

关键词: 海上风电场; 谐波谐振放大; 海底电缆; 系统等效阻抗; 并联滤波器

0 引言

与陆上交流电网中常见的架空线路相比,交流电力电缆的正序电容是相同长度和电压等级架空线路的20~40倍,但其串联阻抗为相同电压等级架空线路的50%~100%。由于交流电力电缆的电容效应,一般在陆上风电场交流并网中并不严重的谐波谐振放大问题,在海上风电场并网中可能会变得十分严重,甚至需要采取技术措施来加以解决^[1-2]。

迄今为止,虽还未见发生在中国的由海上风电场交流并网引起的谐波谐振放大的公开报道,但已有一些相关的报道和研究说明国外已发生过此类问题或者在海上风电场并网规划时已经考虑了对此类问题的应对措施。文献[3]讨论了海上风电场电缆对全系统谐振频率的影响,并计及了陆上电网的背景谐波;文献[4]对风电场和陆上电网同时建模,提出了一种适用于双馈风机并网的频域阻抗分析模型,并给出了谐波电压电流的计算方法;文献[5]研究了分布式风电接入中压配电网时对全系统谐振模式的影响,并分析了风机数量、地下馈线电缆等的影响程度,对分布式风电规划具有指导意义。但上述文献都没有分析治理原理,也没有提出出现问题后的治理措施。文献[6]明确提出了在海上风电场规划时必须考虑由长距离海底电缆(简称海缆)引起的陆上电网背景谐波放大问题,但没有给出具体实

施方法。

最近,国内某海上风电场采用长距离交流海缆接入陆上电网时,在电网的公共连接点(point of common coupling, PCC)出现了严重的谐波放大现象,导致5次谐波电压畸变率超过4%,对电网的安全稳定运行构成了威胁。本文对此现象进行了一些机理分析,并针对此实际工程进行了建模仿真,找出了解决此问题的治理方案。

1 谐波谐振放大机理分析

海上风电场经高压海缆接入陆上电网的一般性结构如图1(a)所示,图中的PCC是考核海上风电接入对陆上电网谐波影响的基准节点。

对于 h 次谐波,可以得到图1(a)的等值电路如图1(b)所示。图1(b)中,陆上电网的背景谐波采用戴维南等效电路表示, h 次背景谐波采用一个等效谐波电压源 \dot{U}_{sysh} 串联一个等效谐波阻抗 Z_{sysh} 表示^[7];海上风电场的谐波源采用诺顿等效电路表示, h 次谐波源采用一个等效谐波电流源 \dot{I}_{windh} 并联一个等效谐波阻抗 Z_{windh} 表示;高压海缆采用 π 形等效电路表示,其中, R_{cable} 、 L_{cable} 和 C_{cable} 分别为等效电路的串联电阻、串联电感和并联电容值; L_{shunt} 为电缆两端并联高抗的电感值。

考虑的所有谐波源均为正序谐波源或负序谐波源,因为零序谐波电流通常可由变压器的连接方式消除,所以不在这里考虑。又由于对静止元件,其负序参数与正序参数完全一致,故负序等效电路与正

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-07-29。

上网日期: 2021-09-22。

序等效电路也完全一致。这样,本文后续谐波分析时的电路模型均采用正序电路。

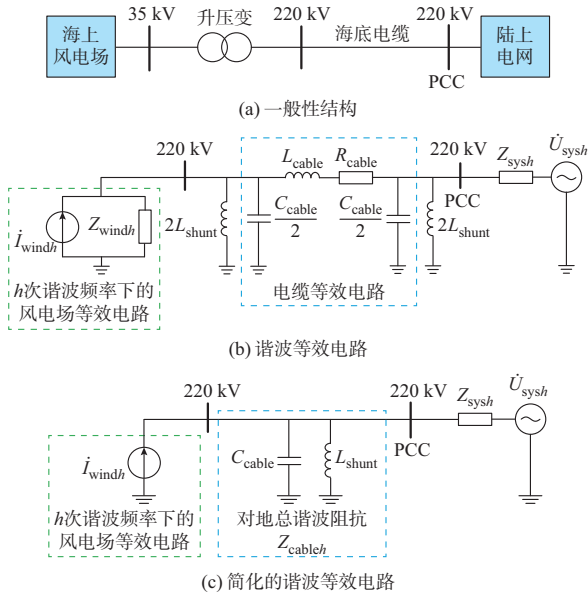


图1 海上风电场经高压海缆接入陆上电网的一般性结构和谐波等效电路

Fig. 1 General structure and harmonic equivalent circuit of offshore wind farm connected to onshore power grid via high-voltage submarine cable

在图1(b)中,设定高抗对电缆的容抗进行全补偿,即 L_{shunt} 满足如下关系式:

$$2\omega_0 L_{shunt} = \frac{1}{0.5\omega_0 C_{cable}} \quad (1)$$

式中: ω_0 为电网工频角频率。

由式(1)可得:

$$L_{shunt} = \frac{1}{\omega_0^2 C_{cable}} \quad (2)$$

对于图1(b)所示的谐波等效电路,作如下简化:①电缆的电感和电阻一般为同电压等级架空线路的一半左右,在进行定性分析时,可以先将其设定为零;②先忽略风电场诺顿等效电路中的并联阻抗 Z_{windh} 支路,即认为风电场侧进入高压电缆的谐波电流就等于 \dot{I}_{windh} 。这样,可得海上风电场经高压海缆并网时的简化谐波等效电路如图1(c)所示。

由式(2)可得图1(c)中 Z_{cableh} 的表达式为:

$$Z_{cableh} = \frac{j\omega L_{shunt} \frac{1}{j\omega C_{cable}}}{j\omega L_{shunt} + \frac{1}{j\omega C_{cable}}} = -j \frac{1}{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}} \frac{1}{\omega C_{cable}} \quad (3)$$

由式(3)可知,在大于基波频率后, Z_{cableh} 总是呈容性,且当频率大于5次谐波频率时,谐波角频率 ω 满足 $\omega^2 \gg \omega_0^2$ 。此时, Z_{cableh} 满足如下关系式:

$$Z_{cableh} \approx -j \frac{1}{\omega C_{cable}} \quad (4)$$

由式(4)可得,当考虑5次及以上的高次谐波时, Z_{cableh} 回归到电缆本身的并联阻抗,电缆两端并联高抗的作用基本上可以忽略不计。

以PCC作为衡量谐波水平的基准节点,PCC处电压 \dot{U}_{PCC} 有如下表达式:

$$\dot{U}_{PCC} = \frac{Z_{cableh} (\dot{U}_{sysh} + Z_{sysh} \dot{I}_{windh})}{Z_{sysh} + Z_{cableh}} \quad (5)$$

显然,当式(5)中分母的虚部等于零时,即

$$\text{Im}(Z_{sysh} + Z_{cableh}) = 0 \quad (6)$$

此时, \dot{U}_{PCC} 会取到很大的值。将式(6)成立时对应的谐波次数称为谐振谐波次数 h_{res} 。与 h_{res} 对应的角频率称为谐振角频率 ω_{res} ,与 h_{res} 对应的频率称为谐振频率 f_{res} 。对照图1, ω_{res} 既可以被理解为串联谐振角频率,因为从 \dot{U}_{sysh} 的角度来看,此时发生了 Z_{sysh} 和 Z_{cableh} 之间的串联谐振; ω_{res} 也可以被理解为并联谐振角频率,因为从 \dot{I}_{windh} 的角度来看,此时发生了 Z_{sysh} 和 Z_{cableh} 之间的并联谐振。

当采用阻抗扫频法来分析系统的谐波谐振放大问题时,通常计算从PCC向整个系统看进去的阻抗 Z_{PCC} 的频率特性,显然 Z_{PCC} 由 Z_{sysh} 和 Z_{cableh} 并联而成,当式(6)成立即发生谐振时, $|Z_{PCC}|$ 取到极大值。这样,确定整个系统谐振频率点的方法就是对 Z_{PCC} 进行频率扫频, $|Z_{PCC}|$ 取到极大值的频率点就是谐振频率点。

令 $Z_{sysh} = R_{sysh} + jX_{sysh}$,则根据式(3),式(6)等价于:

$$X_{sysh, res} = \frac{\omega_{res}}{(\omega_{res}^2 - \omega_0^2) C_{cable}} \quad (7)$$

由于 ω_{res} 大于 ω_0 ,所以发生谐振时的陆上电网等效谐波电抗 $X_{sysh, res}$ 总大于0,即发生谐振时,系统侧的等效阻抗 $Z_{sysh} = R_{sysh} + jX_{sysh}$ 一定呈电感性。

当式(6)或式(7)成立时,图1系统发生了谐波次数为 h_{res} 的谐振,次数与 h_{res} 接近的谐波电压将为很大的值,此时称在 h_{res} 附近发生了谐波谐振放大。

2 谐波谐振放大治理原理

从式(6)和式(7)可以看出,使式(6)或式(7)成立的 ω_{res} 总是存在的,即谐振总是会发生的,避免谐振是不可能的。因此,治理谐振放大存在2条途径。

第1条途径是采用有源的方法。例如,在图1的PCC处并联有源装置,该有源装置采用阻抗重塑控制策略^[8-10],使得在发生谐振的谐波次数 h_{res} 附近呈现很低的阻抗特性,使从PCC看进去的整个系统阻

抗不再呈现高值。采用有源的方法需并联有源装置,投资成本和运行成本都较高,目前在 220 kV 等级的高压电网上应用实例还较少。

另一条途径是采用无源的方法:一种是采用串联型的阻塞滤波器;另一种是采用并联型的低阻抗支路滤波器。其原理都是将发生谐振的谐波次数 h_{res} 移动到不存在谐波源或谐波源的值很小的谐波次数上。从系统背景谐波电压源 \dot{U}_{sysh} 考虑,3次、5次、7次、11次、13次谐波较大;从风电场固有谐波电流源 \dot{I}_{windh} 考虑,2次、3次、5次、7次、11次、13次谐波较大。因此,为避免对上述各次谐波产生谐振放大作用,希望将谐振谐波次数 h_{res} 移动到远离所关注的谐波频率点。实际工程中,加装串联型阻塞滤波器的方案很少被采用,因为对电网运行方式变化的适应性较差;大多数情况下采用加装并联型低阻抗支路滤波器的方案。例如,当 h_{res} 在 5 附近时,加装调谐于 5 次谐波的并联型低阻抗支路滤波器后,就可以消除 5 次谐波的放大问题。

3 实际案例分析

某海上风电场接入电网工程如附录 A 图 A1 所示。风电场 A 安装了 18 台单机容量为 4 MW 的全功率换流器型风力发电机和 36 台单机容量为 4.5 MW 的双馈异步风力发电机,由 220 kV 高压电缆 A 接入陆上电网,其中海缆 12.5 km、陆缆 4.65 km。风电场 B 安装了 45 台单机容量为 6.25 MW 的全功率换流器型风力发电机,由 220 kV 高压电缆 B 接入陆上电网,其中海缆 48.34 km、陆缆 4.6 km。

3.1 谐波放大现象

当只有风电场 A 运行时,PCC 处的电压总谐波畸变率在 1.5% 左右,谐波放大现象并不严重。但当高压电缆 B 空载投入时,PCC 处出现严重的谐波放大现象,其中 5 次谐波单次电压畸变率超过 4%,流过断路器 S0 的 5 次谐波电流接近 100 A;7 次谐波也有一定的放大。为分析这一谐波放大现象放大的是海上风电场的谐波还是陆上电网的背景谐波,需要对海上风电场和陆上电网进行谐波建模。

3.2 海上风电场电网谐波建模

海上风电场电网包括风电机组、变压器、35 kV 电缆和 220 kV 电缆,其中风电机组的谐波特性随工况而变,具有较大的不确定性;而变压器和电缆结构是确定的,其电气参数的不确定性较小,可以精确建模^[11-12]。

对于变压器,其谐波模型采用的是恒定漏电感模型,即根据工频下的变压器漏电抗,算出其漏电

感,用此漏电感作为其谐波频率下的模型^[11-12]。

由于风电机组的谐波特性随工况而变,为简化分析,需要建立确定的风电机组谐波模型。为此,本文基于风电机组制造商提供的风电机组谐波测试数据建立风电机组谐波模型。某型号风电机组的谐波模型结构如附录 A 图 A2 所示,根据如附录 A 表 A1 所示的谐波电流实测数据,推算谐波电势有效值 U_h 如附录 A 表 A2 所示。

3.3 海缆谐波建模

本案例涉及 35 kV 海缆和 220 kV 海缆。与架空线路不同,海缆线路的正、负序电气参数随频率变化剧烈,故必须考虑其电气参数随频率的变化特性^[13-14]。

计算出各次谐波频率下海缆线路的电气参数后,即可建立海缆线路的谐波模型。由于谐波频率较高,即使是 35 kV 短电缆,也应该采用谐波频率下的精确 π 模型,即考虑了电缆分布参数特性的基于双曲函数校正的 π 模型^[15]。电缆线路的精确 π 模型如附录 A 图 A3 所示,模型中参数的表达式如附录 A 式(A1)一式(A3)所示。

3.4 陆上电网谐波建模

本案例海上风电场接入陆上电网的 220 kV 片区,该 220 kV 片区通过升压变压器接入 500 kV 电网。为尽量减小陆上电网谐波建模的不确定性,对 220 kV 电压层做完整建模,而对所连接的 500 kV 电网和 110 kV 及以下电网采用等效模型模拟。

对 500 kV 大电网,其各次谐波下的等效模型可用戴维南等效电路表示。基于所有 500 kV 线路的 $N-1$ 原则,扫描计算从升压变压器向大电网看进去的各次谐波下的等效阻抗^[16-18],其中 5 次和 7 次谐波等效阻抗如附录 A 图 A4 所示。可见,5 次和 7 次谐波等效阻抗构成的范围很小,说明其不确定性较小,又由于 500 kV 电压等级谐波通常较小,因此本案例不考虑 500 kV 大电网的背景谐波。

为模拟 220 kV 电网的背景谐波特性,将谐波源设置在 110 kV 等效负荷上,通过调整 110 kV 等效负荷上的谐波电流源大小,使得 220 kV 电网的背景谐波水平等于所设定的水平。统一的综合负荷模型如附录 A 图 A5 所示。谐波电流源 I_h 按照使 PCC 处的各次谐波电压畸变率为设定值进行整定。对于 110 kV 及以下电压等级电网,原理上等效负荷的大小和组成存在很大的不确定性,其谐波频率下的阻抗特性存在更大的不确定性,因此,谐波建模方面的主要误差来源于无法对 110 kV 及以下电压等级电网进行精确模拟。

3.5 谐波放大现象展示及原因分析

海上风电接入电网案例采用上述方法进行建模。首先,根据所建立的谐波模型,复现实际发生的谐波放大现象。已知当高压电缆B空载投入时,会发生谐波放大现象。仿真计算表明,PCC处5次谐波电压畸变率达3.241%,确实发生了谐波放大现象,且大大超出了单次电压畸变限制值1.0%,必须采取治理措施。

被放大的谐波源性质分析如下。运用叠加定理,分别令海上风电场谐波源和陆上电网背景谐波源单独作用,计算PCC处的电压总谐波畸变率如表1所示。

表1 谐振放大的谐波源位置分析
Table 1 Analysis of harmonic source position for resonance amplification

谐波源接入情况	PCC处电压总谐波畸变率/%
仅接入海上风电场谐波源	0.180
仅接入陆上电网背景谐波源	3.395
同时接入海上风电场谐波源和陆上电网背景谐波源(设所有谐波源初相角为0°)	3.261

由表1可见,谐波放大现象放大的是陆上电网固有的背景谐波电源,海上风电场谐波源对PCC处的谐波电压畸变作用很小。因此,本案例所遇到的谐波放大现象可以归类为陆上电网由于长距离海缆接入引起的背景谐波放大现象,这种现象在外国文献中已有过介绍^[6]。

3.6 谐波谐振放大治理方案

为解决5次和7次谐波放大问题,需要研究治理方案。治理海上风电场经高压海缆接入陆上电网引起的谐波谐振放大问题的一般性方案如图2所示。一般情况下陆上集控中心(PoC)与电网公司的PCC很接近,可以近似认为在电气上是一个点。从PoC向海上风电场侧看进去的阻抗设为 Z_{seah} ,从PCC向电网侧看进去的阻抗设为 Z_{sysh} 。根据前文第1章和第2章的讨论,治理谐波谐振放大的原理是将从PCC处看进去的整个系统阻抗 $Z_{PCC} = Z_{seah} // Z_{sysh}$ (//表示并联)对应的谐振频率点移动到远离所关注的谐波频率点。实现这个目标的手段有2种:一是加装串联阻塞滤波器(阻抗为 Z_{blockh});二是加装并联调谐滤波器(阻抗为 $Z_{filterh}$)。为了设计 Z_{blockh} 或者 $Z_{filterh}$,计算 Z_{seah} 随频率变化的特性如附录B图B1所示,以及 Z_{sysh} 和 Z_{PCC} 随频率变化的特性如图3所示。

由附录B图B1可得:

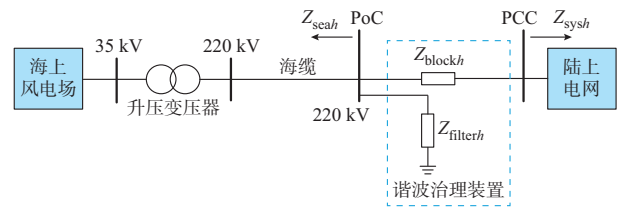


图2 海上风电场经高压海缆接入陆上电网的谐波等效电路和治理装置

Fig. 2 Harmonic equivalent circuit and mitigation device of offshore wind farm connected to onshore power grid via high-voltage submarine cable

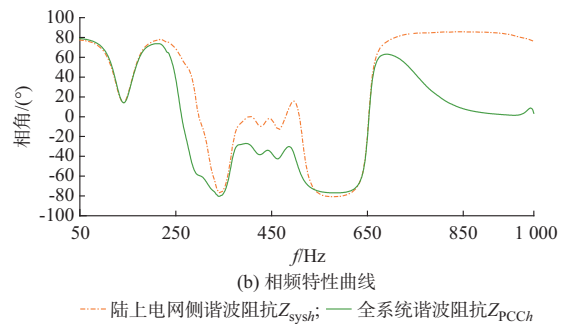
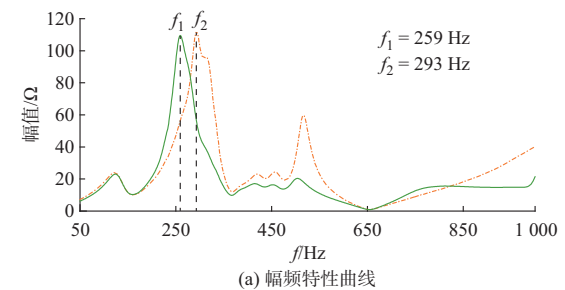


图3 陆上电网侧谐波阻抗 Z_{sysh} 和全系统谐波阻抗 Z_{PCC} 特性

Fig. 3 Characteristics of harmonic impedance of onshore power grid Z_{sysh} and harmonic impedance of whole system Z_{PCC}

1) 高压海缆及其附属高抗本身不会发生谐振,且在高于2次谐波频率后,高压海缆及其附属高抗基本上呈电容性,因此,在谐波频段定性分析时将高压海缆及其附属高抗模拟成一个电容是合理的;

2) 高压海缆连接风电场后存在单一谐振点,且高压海缆越长谐振频率越低,风电场A与风电场B合在一起的系统阻抗 Z_{seah} 在高于其单一谐振频率后呈电容性,且频率越高其阻抗越小,最终趋近于短路。

由图3可得,陆上电网本身的谐波阻抗 Z_{sysh} 在293 Hz频率处有一个谐振点,全系统的谐波阻抗 Z_{PCC} 在259 Hz频率处有一个谐振点,这是造成PCC处5次谐波放大的根本原因。

3.6.1 采用加装串联阻塞滤波器的治理方案

如图2所示,加装的串联阻塞滤波器为一个串

联电抗器,当该串联电抗器电抗 L_{block} 在基波下分别取10、15、20 Ω 时,全系统谐波阻抗 $Z_{\text{PCC}h}$ 的幅频特性和相频特性比较如附录B图B2所示。由图可知,当串联电抗器电抗变大时, $Z_{\text{PCC}h}$ 的谐振频率向低频方向移动。考虑到谐波模型与陆上电网实际一定存在差别,并且陆上电网本身的运行方式变化也会对谐振频率产生影响,因此,采用串联电抗器来消除 $Z_{\text{PCC}h}$ 在5次和7次谐波附近的谐振点并不是一种可靠的方案。

3.6.2 采用加装并联调谐滤波器的治理方案

如图2所示,考虑加装的并联调谐滤波器为一个5次单调谐滤波器^[11],当该5次单调谐滤波器的基波无功容量分别取30、60、90 Mvar时,从PCC处向系统侧看进去的全系统谐波阻抗 $Z_{\text{PCC}h}$ 的幅频特性和相频特性比较如图4所示。

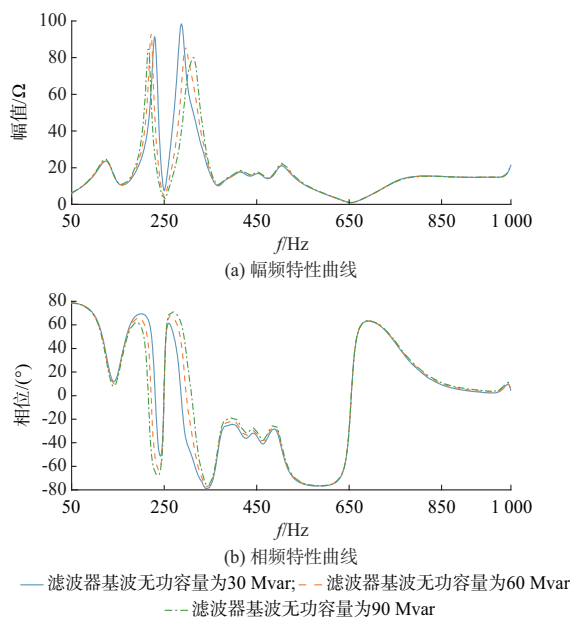


图4 5次并联单调谐滤波器容量变化时全系统谐波阻抗 $Z_{\text{PCC}h}$ 的变化特性

Fig. 4 Variation characteristics of harmonic impedance of whole system $Z_{\text{PCC}h}$ when capacity of the 5th parallel single tuned filter changes

从图4可以看出,加装5次并联单调谐滤波器后, $Z_{\text{PCC}h}$ 的谐振频率从259 Hz移动到约220 Hz和约300 Hz处。由式(6)和式(7)已经证明,谐振总是会发生的,治理原理是将发生谐振的谐波次数 h_{res} 移动到不存在谐波源或谐波源的值很小的谐波次数上。不论是海上风电场谐波源还是陆上电网固有背景谐波源,在220 Hz和300 Hz处的谐波源属于非特征谐波,一般值比较小,可以不予考虑。

同时不管容量多大, $Z_{\text{PCC}h}$ 在约250 Hz处取到最小值,且加装的容量越大, $Z_{\text{PCC}h}$ 在250 Hz左右上升

得越慢,即适应电网运行方式改变的能力越强。显然,加装5次并联单调谐滤波器来消除 $Z_{\text{PCC}h}$ 在5次谐波频率处的谐振是有效的。

3.6.3 推荐采用的谐波谐振放大治理方案

综合上文分析结果,提出分别加装5次和7次并联单调谐滤波器作为治理本案例谐波谐振放大的推荐方案。具体参数如下:5次并联单调谐滤波器容量50 MVA,调谐频率250 Hz,滤波器品质因数40;7次并联单调谐滤波器容量30 MVA,调谐频率350 Hz,滤波器品质因数40。2种单调谐滤波器的具体元件参数如附录B图B3所示。

本案例对风电场侧电网与陆上电网分别进行了建模,其中风电场侧电网结构和参数比较明确,模型可信度高,因此,不需要再对风电场侧电网进行敏感度分析。陆上电网建模的重点放在220 kV侧,对110 kV侧的模拟不够精确,存在相当的不确定性,因此,需要对陆上电网220 kV网架和110 kV等值负荷模型进行推荐方案的敏感度分析,敏感度分析结果分别如附录B图B4和图5所示。

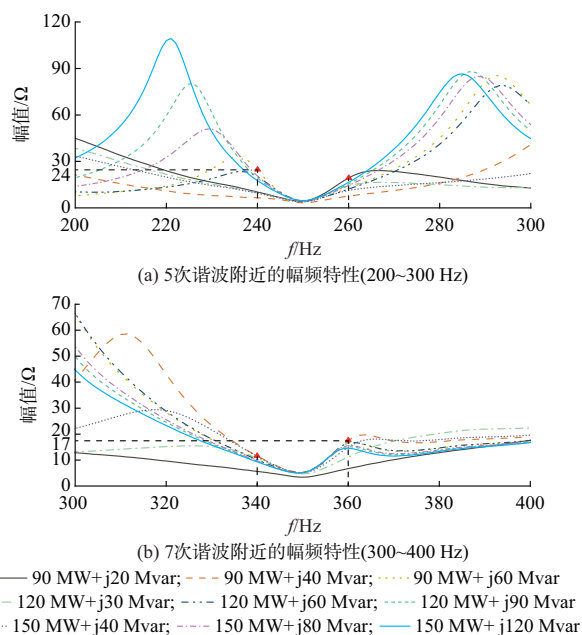


图5 110 kV侧等值负荷变化时 $Z_{\text{PCC}h}$ 的变化特性

Fig. 5 Variation characteristics of $Z_{\text{PCC}h}$ when 110 kV equivalent load changes

单调谐滤波器参数变化引起的调谐频率偏移一般在3 Hz以内;考虑系统基波频率变化范围为0.8 Hz,则系统频率变化引起的5次谐波偏离调谐频率点最大值为4 Hz,7次谐波偏离调谐频率点最大值为5.6 Hz。因此,只要在单调谐滤波器调谐频率点的左右10 Hz频率范围内, $|Z_{\text{PCC}h}|$ 取较小的值,就能消除调谐频率点处发生谐振的可能性。从陆上电

网 220 kV 网架 N-1 扫描分析结果以及改变 110 kV 侧的负荷模型的敏感度分析结果来看,在 5 次谐波频率处, $|Z_{PCCk}|$ 总是处于极小值,在 5 次谐波频率的左右 10 Hz 频率范围内, $|Z_{PCCk}|$ 小于 24 Ω ;在 7 次谐波频率处, $|Z_{PCCk}|$ 总是处于极小值,在 7 次谐波频率的左右 10 Hz 频率范围内, $|Z_{PCCk}|$ 小于 17 Ω 。因此,所推荐的方案具有很强的适应电网结构改变和运行方式改变的能力。

安装了所推荐的 5 次和 7 次单调谐滤波器后,仍然采用已经建立的海上风电场电网和陆上电网谐波模型进行验算,表明 PCC 处的谐波放大现象已经消失,电压总谐波畸变率小于 1%,由海上风电场接入引起的谐波谐振放大问题得到了解决。

4 结语

本文分析了海上风电场经长距离海缆并网时,电缆与陆上电网系统阻抗之间发生的谐波谐振放大机理。建立了包括海上风电场、长距离海缆和陆上电网的谐波模型,提出了解决此类谐波谐振放大问题的并联滤波器方案,从而为以后的类似工程提供了借鉴。主要结论有:

1) 谐波放大与电网参数关系密切,分析谐波放大问题需要对相关电网元件进行精确建模,特别是风电机组、电缆线路和陆上电网;

2) 高压海缆及其附属高抗之间本身不会发生谐振,且在高于 2 次谐波频率后,高压海缆及其附属高抗基本上呈电容特性,因此,在谐波频段定性分析时将高压海缆及其附属高抗模拟成一个电容是合理的;

3) 高压海缆连接风电场后,风电场及高压海缆作为一个整体会发生谐振,但只有一个谐振频率点,且电缆越长谐振频率越低,而过了这个谐振频率点后,风电场及高压海缆作为一个整体呈现为电容特性,随着频率升高最终趋近于短路;

4) 采用加装串联阻塞电抗器的方案来治理谐波谐振放大问题存在很大的不确定性,不是一种合理的方案;

5) 采用加装并联滤波器的方案来治理谐波谐振放大问题设计简单、效果良好,且其效果基本不受系统运行方式变化和电气元件参数变化的影响。

然而,对于 110 kV 及以下电压等级电网,原理上等效负荷的大小和组成存在很大的不确定性,其谐波频率下的阻抗特性存在更大的不确定性。因此,本文未对 110 kV 及以下电压等级电网进行精确建模,这是今后谐波建模需要研究的问题之一。

感谢中广核(嵊泗)新能源有限公司和中广核浙江岱山海上风力发电有限公司的资助!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 邵振国,许昊铂,肖颂勇,等. 新能源电网中的谐波问题[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 178-187.
SHAO Zhenguo, XU Haobo, XIAO Songyong, et al. Harmonic problems in a new energy power grid [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 178-187.
- [2] 王涛,诸自强,年珩. 非理想电网下双馈风力发电系统运行技术综述[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 455-471.
WANG Tao, ZHU Ziqiang, NIAN Heng. Review of operation technology of doubly-fed induction generator-based wind power system under nonideal grid conditions [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 455-471.
- [3] BOLLEN M H J, YANG Kai. Harmonic aspects of wind power integration [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(1): 14-21.
- [4] THAO N G M, UCHIDA K, KOFUJI K, et al. A comprehensive analysis study about harmonic resonances in megawatt grid-connected wind farms [C]// IEEE 3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications, October 19-22, 2014, Milwaukee, USA: 387-394.
- [5] PATEL D, VARMA R K, SEETHAPATHY R, et al. Impact of wind turbine generators on network resonance and harmonic distortion [C]// IEEE 23rd Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE 2010), May 2-5, 2010, Calgary, Canada: 1-6.
- [6] FILLION Y, DESCHANVRES S. Background harmonic amplifications within offshore wind farm connection projects [C]// International Conference on Power Systems Transients (IPST2015), June 15-18, 2015, Cavtat, Croatia.
- [7] 唐力,胡海涛,李朝阳,等. 考虑谐波源支路类型的谐波谐振分析方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16): 132-140.
TANG Li, HU Haitao, LI Zhaoyang, et al. Harmonic resonance analysis method considering branch type of harmonic source [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 132-140.
- [8] HARNEFORS L, BONGIORNO M, LUNDBERG S. Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3323-3334.
- [9] 曾正,赵荣祥,吕志鹏,等. 光伏并网逆变器的阻抗重塑与谐波谐振抑制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4547-4557.
ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, LÜ Zhipeng, et al. Impedance reshaping of grid-tied inverters to damp the series and parallel harmonic resonances of photovoltaic systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4547-4557.

- [10] 梁倍华,何晋伟,金子开,等.基于谐波阻抗匹配的微电网互联线路谐振分析及抑制措施[J].电力系统自动化,2021,45(14):123-131.
LIANG Beihua, HE Jinwei, JIN Zikai, et al. Analysis and suppression measures for resonance on interconnection line between microgrids based on harmonic impedance matching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (14): 123-131.
- [11] WAKIEH G J. 电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计[M].徐政,译.北京:机械工业出版社,2003.
WAKIEH G J. Power systems harmonics—fundamentals, analysis and filter design[M]. XU Zheng, trans. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [12] CIGRE JWG C4/B4.38. Network modelling for harmonic studies[R]. Paris: CIGRE, 2019.
- [13] 钱洁. 电力电缆电气参数及电气特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
QIAN Jie. Study on electrical parameter calculation method and electrical characteristics of power cables [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [14] 徐政,钱洁. 电缆电气参数不同计算方法及其比较[J]. 高电压技术,2013,39(3):689-697.
XU Zheng, QIAN Jie. Comparison of different methods for calculating electrical parameters of power cables [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 689-697.
- [15] BENATO R, PAOLUCCI A. 超高压交流地下电力系统的性能和规划[M].徐政,译.北京:机械工业出版社,2012.
BENATO R, PAOLUCCI A. EHV AC undergrounding electrical power performance and planning [M]. XU Zheng, trans. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [16] 段慧,肖龙海,徐政.基于潮流数据的输电线路谐波模型和电磁暂态模型研究[J].华东电力,2007,35(9):9-11.
DUAN Hui, XIAO Longhai, XU Zheng. Harmonic models and electromagnetic transient models of transmission lines based on power flow data[J]. East China Electric Power, 2007, 35(9): 9-11.
- [17] 段慧. 交流系统谐波阻抗等值与背景谐波分析[D]. 杭州:浙江大学,2008.
DUAN Hui. AC system harmonic impedance equivalence and background harmonic analysis [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [18] 徐政,段慧. 全频段交流系统等值与谐波计算程序的研发[J]. 高电压技术,2008,34(6):1131-1137.
XU Zheng, DUAN Hui. Program for AC system wide frequency range equivalence and harmonic calculation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1131-1137.

徐 政(1962—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,IEEE Fellow,主要研究方向:大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、新能源并网、电力谐波与电能质量。E-mail:xuzheng007@zju.edu.cn

金砚秋(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向:大规模交直流电力系统分析、电力谐波与电能质量。E-mail:22010063@zju.edu.cn

李斯迅(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向:大规模交直流电力系统分析、电力谐波与电能质量。E-mail:lsixun@zju.edu.cn

(编辑 章黎)

Mechanism Analysis and Mitigation of Harmonic Resonance Amplification Caused by AC Integration of Offshore Wind Farm

XU Zheng, JIN Yanqiu, LI Sixun, ZHANG Zheren

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Because the capacitive effect of power cables at the same voltage level is over 20 times larger than that of overhead lines, the harmonic resonance amplification problem which is not serious in the onshore wind farm integration may become very serious in the offshore wind farm integration. To this end, this paper studies the harmonic resonance amplification problem caused by the offshore wind farm integration and its mitigation principle. Firstly, the harmonic resonance amplification mechanism caused by offshore wind farm integration is analyzed, and the technical path of mitigation is given in principle. Then, taking a real offshore wind power integration project as a study case, the harmonic models of the offshore wind power grid and the onshore power grid are established, respectively, including the harmonic models of cables, transformers and wind turbines, the equivalent harmonic models of the extra-high voltage (EHV) large-scale grid and the low-voltage distribution network. According to the established harmonic models, the causes of harmonic resonance amplification are analyzed, and a mitigation scheme for solving the problem of harmonic resonance amplification is proposed and verified. Finally, the mechanism and mitigation principle of harmonic resonance amplification caused by offshore wind farm integration are summarized.

Key words: offshore wind farm; harmonic resonance amplification; submarine cable; system equivalent impedance; parallel filter

