

海上风电交流送出系统谐振过电压产生原因及抑制措施

杨大业¹, 宋瑞华¹, 项祖涛¹, 刘冬², 晁武杰³, 阎越圣²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 100192;

2. 浙江省新能源投资集团股份有限公司, 浙江省杭州市 310000;

3. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建省福州市 350007)

摘要: 电缆单位长度电容为同电压等级架空线路的20倍以上,越来越多的海上风电经交流电缆并网使得送出系统自然谐振频率降低,增大了系统谐振风险。针对某海上风电场并网过程中出现的谐振过电压现象,分析了故障录波数据。基于送出系统阻抗模型进行机理分析,并通过电磁暂态仿真验证了送出系统存在2倍频附近自然谐振频率为风电场合空载变压器、合空载线路操作引发谐振过电压的根本原因。结合工程实际,提出改变送出系统运行方式、优化静止无功发生器控制保护系统和增加接入负荷量的联合抑制措施。最后,通过仿真及现场试验验证了所提措施的有效性。

关键词: 海上风电; 谐振过电压; 空载变压器; 空载线路; 现场试验

0 引言

目前,中国海上风电场主要以交流方式接入电网,已投运及在建风电场单回电缆长度最长已接近100 km,主要集中在江苏、浙江、福建等东部沿海省份。“十四五”期间,海上风电场建设规模将保持快速增长,并向深远海发展。

相同长度和电压等级的交流电缆对地电容约为陆上架空线路的20~40倍^[1]。电网中大规模电缆的应用较大程度上降低了接入电网的自然谐振频率,在谐波源的作用下易引发谐波谐振,严重情况下会出现高幅值谐振过电压,危及电网安全稳定运行。

国内陆上电网中典型的谐振过电压事件为二次谐波谐振引发的青藏直流闭锁故障^[2];国外也存在多场景下的谐波过电压问题^[3]。针对交流海上风电送出系统的谐振过电压事件国内尚未见报道,仅有少数文献报道了谐波谐振引发的电能质量问题。文献[1]对国内某海上风电场送出系统引起谐波谐振放大现象的产生机理及治理方案进行了研究。

国内外针对多场景下系统谐振过电压问题的研究内容较多。系统谐振过电压发生场景主要有:高压直流输电送端系统、高压电缆接入系统和电力系统故障恢复初期弱系统^[3-5]。引发谐振过电压的操作主要有:

甩负荷、故障清除、空载线路合闸、空载变压器合闸^[6-8]。系统谐振过电压应考虑的主要因素有:接入主网的网架结构及强度、变压器磁饱和特性、负荷、线路模型、避雷器等^[9-13]。系统谐振过电压的抑制措施主要有:改变系统运行方式、断路器加装合闸电阻、断路器加装选相合闸装置、并联滤波器^[14-21]。系统谐振现象由自然谐振频率、阻抗幅值、阻尼和谐波源等因素共同决定。然而,与其相关的诸如电网运行方式、变压器磁饱和特性、负荷特性及谐波源特性等均难以确定,给谐振过电压风险评估带来了挑战^[22]。

2021年浙江某海上风电场进行合空载变压器(空变)、合空载线路(空线)试验过程中出现了严重谐振过电压问题,最大相电压峰值达1.96 p.u.,最长持续时间达14 s,造成邻近风机及静止无功发生器(SVG)跳闸、海缆盆式绝缘子受损、部分低压设备损坏。这是国内海上风电场送出系统首次出现的高幅值谐振过电压现象,国外相关文献报道的相似的谐振过电压,其过电压水平较低且持续时间较短。针对这一现象,本文通过理论计算及仿真研究了现场谐振过电压的特性及产生机理,采用PSCAD/EMTDC仿真软件进行了复现及分析,并提出相应的措施建议。现场试验验证了所提措施的有效性。

1 送出系统谐振过电压机理分析

图1(a)所示为海上风电场典型交流送出系统接线图。忽略各支路电阻,海缆按 π 型电路等效,海上升压变压器(升变)按T型电路等效,考虑风电机组、SVG支路未运行,送出系统等效电路如图1(b)

收稿日期: 2022-01-26; 修回日期: 2022-03-29。

上网日期: 2022-05-26。

国家电网公司科技项目(中远距离海上风电规模化送出系统多时空协调优化控制理论研究,5100-202155305A-0-0-00)。

所示。图中： L_{ps} 为计量站C看向电网的等值电感； L_m 和 L_T 分别为风电场海上升压变励磁电感、漏电感； L_{line} 和 C_{cable} 分别为风电场海缆电感、对地电容； L_{shunt1} 和 L_{shunt2} 分别为海缆两侧并联电抗器电感。

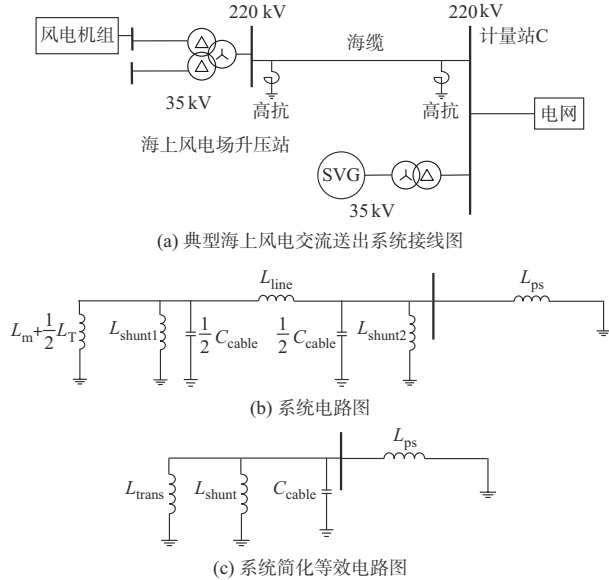


图1 典型送出系统接线及电路图

Fig. 1 Typical transmission system wiring and circuit diagrams

对于图1(b)所示的送出系统电路图,做如下简化:电缆的单位长度电感值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。得到海上风电场经高压海缆并网时的简化等效电路如图1(c)所示。设定 L_{trans} 满足:

$$L_{trans} = \lambda L_{shunt} \quad (1)$$

式中: L_{trans} 为变压器励磁电感与二分之一漏电感之和; L_{shunt} 为等效并联电抗; λ 为系数。其中, λ 在变压器稳态运行期间取值很大,可忽略变压器支路;在变压器暂态运行且出现饱和时, λ 的取值变小,此时变压器支路不能忽略。

在图1(c)中,设定高抗对电缆的容抗进行80%补偿,即 L_{shunt} 满足式(2)。

$$L_{shunt} = \frac{1}{0.8\omega_0^2 C_{cable}} \quad (2)$$

式中: ω_0 为电网工频角频率。

依据式(1)、式(2),从计量站母线看入的海上风电场侧等值阻抗 Z_{WF} 的表达式为:

$$Z_{WF} = \frac{j\omega \frac{\lambda}{1+\lambda} L_{shunt} \frac{1}{j\omega C_{cable}}}{j\omega \frac{\lambda}{1+\lambda} L_{shunt} + \frac{1}{j\omega C_{cable}}} = -j \frac{1}{1 - \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \frac{0.8\omega_0^2}{\omega^2} \frac{1}{\omega C_{cable}}} \quad (3)$$

式中: ω 为系统角频率。

由式(3)可知,当系统角频率 $\omega > \omega_0$ (λ 取值远大于1,即忽略变压器支路)时, Z_{WF} 均呈现容性。设等效电容值为 C_{eq} ,则上述系统自然谐振频率 f_{res} 为:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{ps} C_{eq}}} \quad (4)$$

由于海缆对地电容较大,则 C_{eq} 较大,随海缆数量及长度增加,则上述系统自然谐振频率变小。

考虑暂态过程中空变饱和的影响,即 λ 减小,则 C_{eq} 减小,系统自然谐振频率 f_{res} 增大(若 Z_{WF} 为感性,则不会引起发系统谐振,所以分析该系统谐振问题时可假设 Z_{WF} 呈现容性,即 λ 减小未引起 Z_{WF} 中电抗符号发生变化)。

当自然谐振频率与系统中扰动量频率相接近且回路阻尼不足时,则会发生较严重的谐振过电压现象。

2 现场系统谐振特点及原因分析

2.1 某海上风电场送出系统结构

浙江某海上风电场A、B临时送出系统见图2。

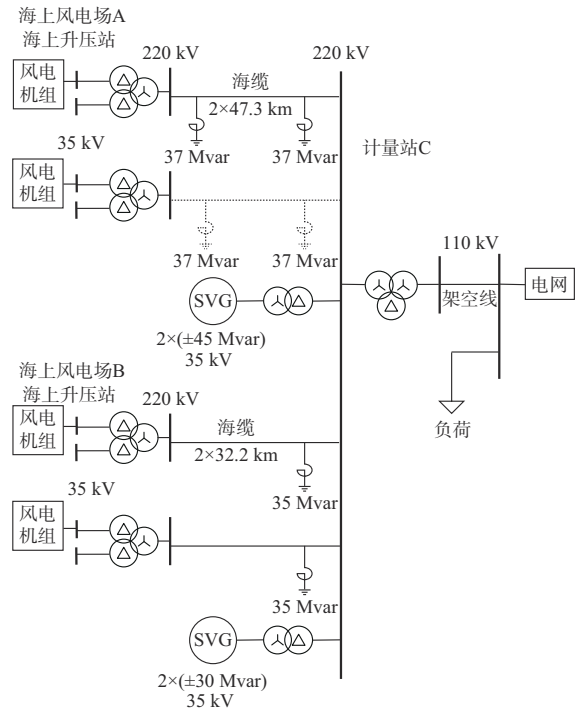


图2 海上风电场A、B临时送出系统接线图

Fig. 2 Wiring diagram of temporary transmission system of offshore wind farm A and B

风电场A装机容量为400 MW,风电场侧配置2台额定容量为240 MV·A的变压器升至220 kV,经两回长度为47.3 km的220 kV海缆(其中一回临时送出阶段尚未投运)接入计量站C,且每回海缆两侧均装设有额定容量为37 Mvar的高压电抗器。风

电场B装机容量为300 MW,风电场侧配置两台额定容量为180 MV·A的变压器升压至220 kV,经两回长度为32.2 km的220 kV海缆接入计量站C,且每回海缆计量站侧装有额定容量为35 Mvar的高压电抗器。计量站C配置一台额定容量为98 MV·A的联络变降压至110 kV,经一回110 kV架空线路接入本地110 kV主网。

2.2 现场合空变引起的谐振过电压特性分析

操作前海上风电场B的2回海缆及2台升压变均在运行;海上风电场A的1回海缆运行,两风电场风电机组均未运行,海上风电场B的2组SVG在运行。在上述运行条件下开展海上风电场A的1台升压变带电试验。海上风电场A合空变过程中海上升压站侧220 kV母线电压、单组SVG电流、变压器励磁涌流故障录波见图3。由图可知,合空变后约129 ms,计量站2组SVG跳闸,370 ms后,系统电压出现持续约3.3 s的振荡现象,220 kV母线相电压有效值最大升高至216 kV(合闸前为133 kV),峰值最大值为1.96 p.u.(基准值为 $(252/\sqrt{3})\times\sqrt{2}$ kV),随后系统恢复稳态(220 kV母线相电压降为137.6 kV)。励磁涌流产生后先衰减,但在370 ms后由衰减趋势转变为增大趋势,并出现持续时间约3.3 s的振荡现象,随后系统恢复稳态,励磁涌流最大值出现在C相(不考虑发生振荡时段),为1.036 kA。

附录A图A1为220 kV母线C相电压频谱图,可知电压谐波成分以2倍频为主,且幅值超过了基波分量,出现了明显的二次谐波谐振。对海缆电流波形进行分析可得到同样的结果。

2.3 现场合空线引起的谐振过电压特性分析

操作前海上风电场B一回海缆及1台升压变在运行,计量站SVG与风电场A、B机组均未运行。

计量站C至海上风电场A海缆线路的计量站C侧合空线操作,计量站C的220 kV母线电压故障录波见附录A图A2,操作后约100 ms时系统电压出现持续约14 s的振荡,220 kV系统相电压峰值最大值升至1.68 p.u.,随后系统电压恢复至正常运行范围。合空变、合空线过程现场试验波形数据已共享,见支持数据。

对220 kV母线B相电压进行频谱分析,其电压谐波分量以2倍频为主,出现了明显的二次谐波谐振。对海缆电流进行分析可得到同样的结果。

2.4 现场谐振过电压产生原因分析

2.4.1 基于阻抗理论的合空变谐振过电压分析

在2.2节系统运行工况下,不考虑主变饱和特性,从计量站C侧220 kV母线看入的海上风电送出系统阻抗特性如图4所示。从图4中可以看出,合空变后的海上风电送出系统在88 Hz处存在自然谐振

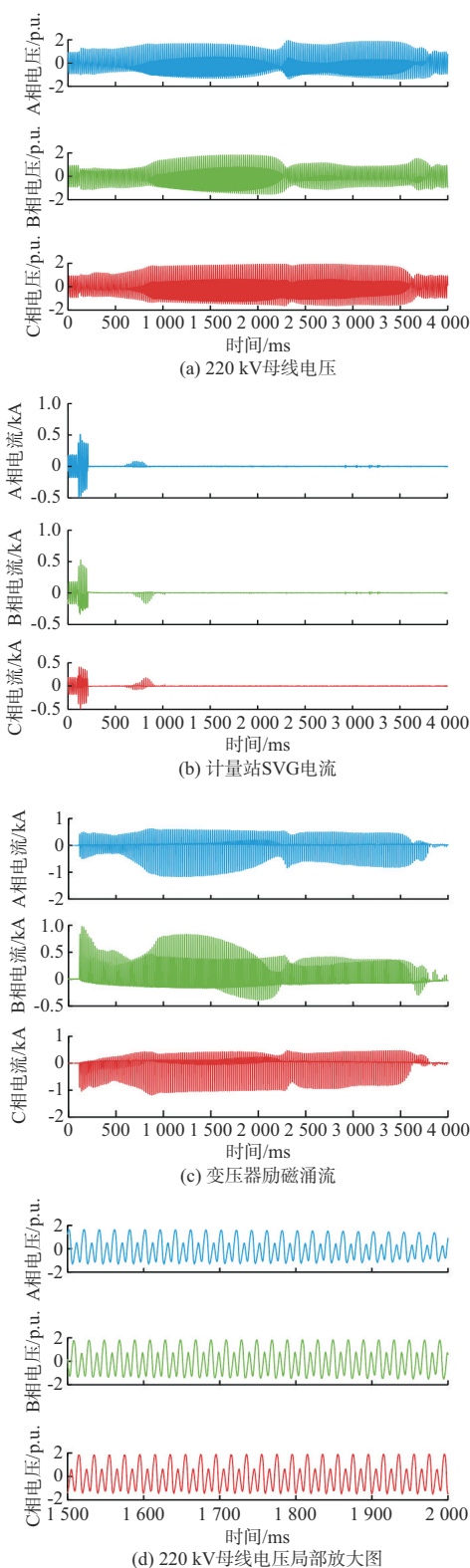


图3 海上风电场A合空载变压器故障录波
Fig. 3 Fault recording of energizing no-load transformer in offshore wind farm A

点。进一步考虑海上升压变的励磁饱和特性,即主变等效励磁电抗减小,约为漏抗的27倍时,系统的

自然谐振频率为 100 Hz, 该谐振特性进一步降低了合空变励磁涌流中 2 倍频分量的阻尼水平^[23]。

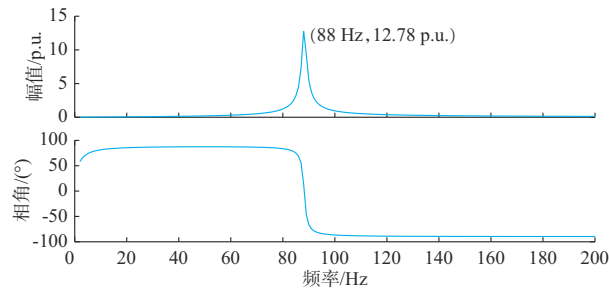


图4 海上风电送出系统阻抗特性

Fig. 4 Impedance characteristics of offshore wind power transmission system

分析得到现场合空变谐振过电压产生原因:海上风电场 A 合空变操作时,当升压变的磁路饱和程度使得励磁电抗约为升压变漏抗的 27 倍时,系统的自然谐振点频率为 100 Hz,与励磁涌流 2 倍频分量的合拍作用下,系统出现电气谐振现象。随着主变磁饱和程度变化及励磁涌流分量衰减,谐振消失。

2.4.2 基于阻抗理论的合空线谐振过电压分析

在 2.3 节系统运行工况下,不考虑主变磁饱和

特性影响,经系统阻抗频率特性分析,合空线后形成的系统在 97 Hz 处存在自然谐振点。另外,合空线前系统处于轻载状态,合空线操作使得计量站联络变饱和,产生 2 倍频谐波分量。

现场合空线谐振过电压产生机理:合空线后所形成的系统在稳态下存在 97 Hz 的自然谐振频率;合空线过程中的暂态过电压使得处于轻载状态下的联络变、海上风电场 B 升压变一定程度上进入饱和,使得系统谐振频率进一步接近 2 倍频,并激发变压器涌流,在涌流 2 倍频分量的作用下,系统出现谐振现象,随着涌流衰减,谐振消失。

3 现场系统谐振现象仿真复现

3.1 仿真模型

在 PSCAD 平台上建立了如图 2 所示的海上风电场送出系统电磁暂态仿真模型。图 2 中,从计量站 C 的 110 kV 母线看入的 110 kV 系统等值阻抗为 $(0.50+j9.93)\Omega$ 。表 1 给出了海上升压变、计量站联络变主要技术参数。表 2 给出了海上风电场 A、B 所采用 220 kV 海缆的序参数。

表 1 海上升压变和联络变主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of offshore step-up transformer and interconnecting transformer

设备名称	额定容量/(MV·A)	额定电压/kV	联接组别	短路阻抗/%	空载损耗/kW
风电场 A 升压变	240	230/36.7/36.7	Yn,d11,d11	11.17	103.0
风电场 B 升压变	180	230/36.7/36.7	Yn,d11,d11	11.42	86.4
联络变	98	230/115/10	YN,yn0,d11	12.00	67.0

表 2 220 kV 海缆序参数

Table 2 Sequence parameters of 220 kV submarine cable

风电场	序分量	单位长度电阻/ ($m\Omega \cdot m^{-1}$)	单位长度电抗/ ($m\Omega \cdot m^{-1}$)	单位长度电 容/($nF \cdot m^{-1}$)
A	零序	0.203 6	0.124 0	0.126 9
	正序	0.061 6	0.149 3	0.126 9
B	零序	0.217 8	0.131 8	0.118 2
	正序	0.069 8	0.156 7	0.118 2

风电场 A 升压变模型中采用的励磁曲线见附录 B 图 B1,海缆采用频率相关模型。海缆线路两侧及 220 kV 母线均配置额定电压为 216 kV 的避雷器。

2.2 节及 2.3 节中谐振过电压事件发生时,两风电机组均未运行,表明风电机组不参与谐振过电压的产生。因此,仿真建模中未考虑风电机组及其 35 kV 集电线路。

3.2 合空变过电压仿真复现

对所建立的海上风电送出系统电磁暂态模型进行时域仿真,在 107 ms 时,海上风电场 A 升压变进行空载合闸操作,在 207 ms 时计量站 SVG 跳闸。海缆海上升压站侧电压及升压变励磁涌流仿真波形如图 5 所示。由图 5 可知,送出系统电压、电流出现持续约为 1700 ms 的振荡,电压最大峰值为 2.05 p.u.,励磁涌流最大值为 608 A(不考虑发生振荡时段)。电压、电流中主要谐波为 2 倍频分量,仿真波形与现场录波基本一致。随着励磁涌流逐渐衰减,系统电压恢复至正常运行状态。

3.3 合空线过电压仿真复现

利用上述海上风电送出系统电磁暂态模型进行计量站至风电场 A 的海缆计量站侧合空线时域仿真,附录 B 图 B2 为计量站 220 kV 母线电压,对 A 相电压在 1.5~2 s 时段内的谐波频谱进行分析可知,合空线后计量站侧 220 kV 母线电压最大峰值为 2.05 p.u.,谐波以 2 倍频分量为主,且幅值超过了基波分量,与现场录波基本一致。

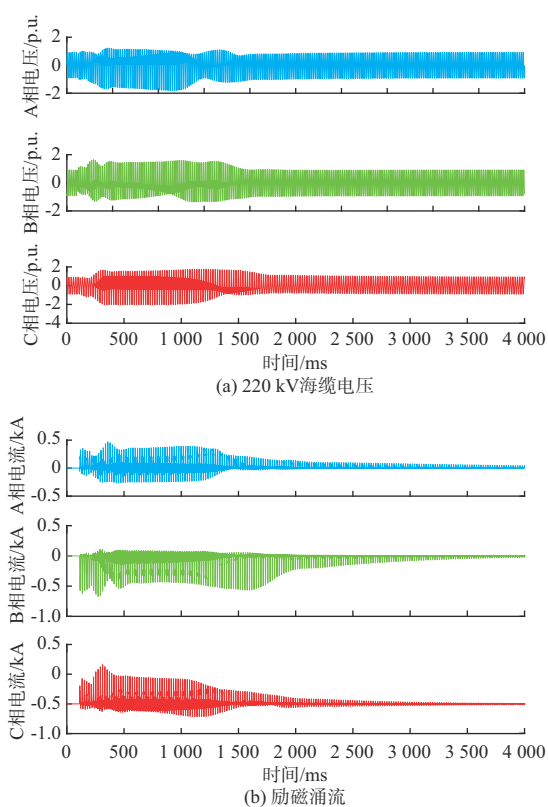


图5 海缆电压仿真波形及变压器励磁涌流
Fig. 5 Simulation waveforms of submarine cable voltage and inrush current of transformer

4 系统谐振过电压抑制措施及试验验证

4.1 系统谐振过电压抑制措施

从转移该送出系统2倍频自然谐振点的角度出发,可采用的方法有改变海缆投运数量和改变陆上系统阻抗。为保证海上风电场A、B均能完成启动调试及正常送电,海上风电场海缆投运方式有2种:3回海缆均运行和风电场A、B各1回海缆运行。海缆数量减少会使送出系统自然谐振频率变大。

与计量站C连接的电网侧220 kV变电站D配置了3台主变。正常运行时,变电站D内3台主变110 kV侧分列运行,其中一台主变为计量站C及部分负荷供电。通过改变3台主变110 kV侧运行方式,即2台主变110 kV侧并列运行,共同为计量站C及部分负荷供电,电网侧等值阻抗将减小,使送出系统自然谐振频率变大。

表3给出了3种不同工况下系统在2倍频附近的自然谐振点。从表中自然谐振频率可以看出,变电站D的2台主变作为电源为计量站C供电(从计量站C的110 kV母线看入的110 kV系统等值阻抗为 $(0.39+j7.72)\Omega$,海上风电场A、B各1回海缆运行时,系统谐振频率超过了2倍频,再考虑到操作过程

变压器饱和会使系统自然谐振频率进一步变大,该方式对抑制谐振过电压有利。

表3 不同运行方式下送出系统自然谐振频率
Table 3 Natural resonant frequency of transmission system in different operation modes

变电站运行方式安排	海缆运行方式安排	自然谐振频率/Hz
1台主变为计量站C供电	3回海缆运行	88
1台主变为计量站C供电	海上风电场A、B各1回海缆运行	97
2台主变为计量站C供电	海上风电场A、B各1回海缆运行	104

另外,从现场录波波形可知,SVG运行有利于抑制谐振过电压,但SVG在暂态过程中存在跳闸风险;投入负荷有利于提高系统阻尼^[11]。在抑制措施中同时考虑上述2种因素。

考虑2台主变作为电源为计量站C供电、海上风电场A、B各1回海缆运行、SVG投入(合空变操作后60 ms闭锁)及变电站D的110 kV侧带100 MW负荷(50%恒阻抗负荷+50%电动机负荷),海上风电场A合空变操作时计量站C的220 kV母线电压如图6所示。仿真结果表明,所提出的联合抑制措施可以明显抑制系统谐振过电压。

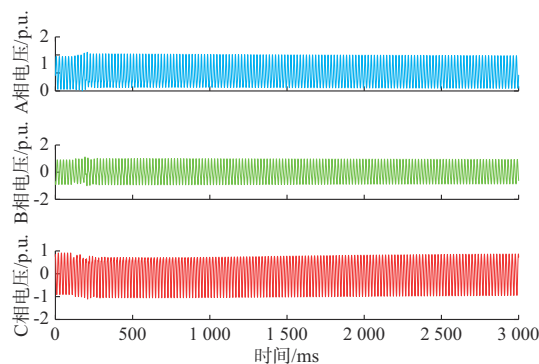


图6 220 kV母线电压仿真波形
Fig. 6 Simulation waveforms of 220 kV bus voltage

4.2 抑制措施现场实施效果

综上所述,为了抑制2倍频谐波谐振,现场海上风电场A合空线、合空变操作前采取相应措施:1)变电站D的2台主变110 kV母线并列运行作为启动试验电源;2)变电站D的2台主变110 kV母线带负荷约为100 MW;3)计量站C的2组SVG运行,且对SVG保护定值进行了合理修改,以提高其抗扰动能力。

现场风电场A进行了合空线、合空变操作,附录C图C1为海上升压站A合空线、合空变过程中计量站C的220 kV母线电压故障录波。由图可知,操

作后系统未出现2倍频谐波谐振现象,操作过电压最大峰值分别为1.09、1.08 p.u.。试验结果验证了本文所提抑制措施的有效性。

5 结语

1)相同长度和电压等级海缆电容是架空线路的20倍以上,使得海上风电场送出系统自然谐振频率减小,当谐振频率接近倍频(尤其是2、3倍频)时,风电场合空线、合空变等操作易引发系统短时谐振,危及设备安全和影响海上风电送出系统安全稳定运行。

2)由于合空变过程中励磁阻抗变化较大,对处于暂态过程中的送出系统自然谐振频率的影响较大。变压器磁饱和使得励磁阻抗减小,从而增大自然谐振频率,暂态过程中送出系统谐振点在一定范围内变化,更易引发系统短时谐振。

3)从转移系统谐振点、增加系统阻尼等角度考虑,可采用操作前调整系统运行方式、投入SVG和投入负荷等方法抑制谐振过电压。

4)其他应对海上风电场送出系统谐振过电压的措施建议:海上风电接入系统较弱(临时接入低电压等级电网、电网黑启动等情况)或规模化接入时,需开展谐振过电压专题研究,若存在风险,可采用改变接入方案、加装全波过电压保护等谐振过电压应对措施。

本文重点针对海上风电场220 kV主设备启动带电过程开展研究,未考虑35 kV集电线路电缆及风电机组特性的影响,这是考虑海上风电送出系统不同运行阶段时需要研究的问题之一。另外,谐振频率点附近系统阻尼是影响谐振过电压的重要因素之一,需针对复杂系统开展阻尼定量研究,提出相应指标,以便更准确地评价系统谐振过电压风险。

本文相关试验波形数据已共享,可在本刊网站支撑数据处下载(<http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20220126001>)。

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] 徐政,金砚秋,李斯迅,等.海上风电场交流并网谐波谐振放大机理分析与治理[J].电力系统自动化,2021,45(21):85-91.
XU Zheng, JIN Yanqiu, LI Sixun, et al. Mechanism analysis and mitigation of harmonic resonance amplification caused by AC integration of offshore wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 85-91.
- [2] 周佩朋,项祖涛,杜宁,等.西北750 kV电网合空变导致青藏直流闭锁故障分析[J].电力系统自动化,2013,37(10):129-133.
ZHOU Peipeng, XIANG Zutao, DU Ning, et al. Analysis on blocking of Qinghai-Tibet DC system caused by transformer energizing in northwest China 750 kV grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 129-133.
- [3] POVH D, SCHULTZ W. Analysis of overvoltages caused by transformer magnetizing inrush current [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, PAS-97(4): 1355-1365.
- [4] 程改红,徐政.电力系统故障恢复初期的谐波过电压问题[J].电网技术,2005,29(10):14-19.
CHENG Gaihong, XU Zheng. Analysis and control of harmonic overvoltages during early stages of power system restoration [J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 14-19.
- [5] CHO S D, MORK B A, MUSTAPHI K K. Transient and harmonic overvoltages related to transformer and transmission line interaction during black start energization [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2003, 36(20): 513-518.
- [6] BOURGAULT O, MORIN G. Analysis of a harmonic overvoltage due to transformer saturation following load shedding on Hydro-Quebec-NYPA 765 kV interconnection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(1): 397-405.
- [7] BOOTH W, WASILOWSKI R, NIEBUHR W, et al. Dropping and fault clearing transformer-terminated EHV lines [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(2): 729-736.
- [8] CANAL T, ZGAINSKI F X, RENOARD V L, et al. Determination of the saturation curve of power transformers by processing transient [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 195: 107153.
- [9] OHNO T, BAK C L, AKIHIRO A, et al. Derivation of theoretical formulas of the frequency component contained in the overvoltage related to long EHV cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 866-876.
- [10] LENNERHAG O, ROGERSTEN R, RÅSTRÖM S. A parallel resonance investigation in stockholm's future cabled transmission grid: a prospective study on transformer energization [C]// 2020 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), October 12-15, 2020, Chicago, USA: 1-5.
- [11] LENNERHAG O, BOLLEN M H J. Impact of uncertainties on resonant overvoltages following transformer energization [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 187: 106503.
- [12] 张星海,甄威,马御棠,等.换流站中500 kV站用变铁磁谐振过电压的研究[J].电网技术,2012,36(3):56-62.
ZHANG Xinghai, ZHEN Wei, MA Yutang, et al. Research on ferroresonance overvoltage occurred in 500 kV transformer for power supply of converter station [J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 56-62.
- [13] DE MATTOS L M N, MENDES A M P, TAVARES M C, et al. Enhanced analysis of oscillatory undamped overvoltages in transformer energization [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 138: 72-77.
- [14] LENNERHAG O, LUNDQUIST J, BOLLEN M H J. Temporary detuning of cabled transmission grids for mitigation of resonant overvoltages [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2): 1050-1057.
- [15] 曹斌,张鹏,陈波,等.基于PSCAD的500 kV自耦变压器铁磁

- 谐振过电压仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 155-161.
- CAO Bin, ZHANG Peng, CHEN Bo, et al. Simulation of ferroresonance overvoltage caused by commissioning 500 kV auto-transformer based on the PSCAD [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 155-161.
- [16] 李振强, 谷定燮, 戴敏. 特高压空载变压器谐振过电压和励磁涌流分析及抑制方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 387-392.
- LI Zhenqiang, GU Dingxie, DAI Min. Analysis and suppression method of no-load ultra high voltage transformer resonance overvoltage and inrush current [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 387-392.
- [17] 林集明, 王晓刚, 班连庚, 等. 特高压空载变压器的合闸谐振过电压[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 5-10.
- LIN Jiming, WANG Xiaogang, BAN Liangeng, et al. Resonance overvoltage caused by energizing no-load transformers in 1 000 kV AC transmission system [J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 5-10.
- [18] FOUAD A, ELSHAHED M, SAYED M, et al. Harmonic resonance overvoltage due to main transformer energization in large wind farms, Zafarana, Egypt[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2019, 10(4): 731-743.
- [19] ATEFI M A, SANAYE-PASAND M, BAHARI S. Preventing transformer energizing resonant overvoltages using surge arrester temperature rise index and controlled closing method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 998-1006.
- [20] 班连庚, 郑彬, 周佩朋, 等. 特高压交流变压器选相合闸技术研究及工程应用[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1226-1233.
- BAN Liangeng, ZHENG Bin, ZHOU Peipeng, et al. Research and engineering application of phase selection closing technology for UHV AC transformers [J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1226-1233.
- [21] 董国震, 和敬涵. 电力系统局部电路谐波谐振产生原因分析及对策[J]. 继电器, 2007, 35(1): 77-80.
- DONG Guozhen, HE Jinghan. Causal analysis and countermeasure on harmonic resonance in local circuit of electric power systems[J]. Relay, 2007, 35(1): 77-80.
- [22] LETERME W, HEYLEN E, VAN HERTEM D. On the use of the frequency domain in assessing resonant overvoltages during transformer energization [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 196: 107164.
- [23] 王育学, 曹文斌, 黄明辉, 等. 变压器零模涌流解析分析及其等值电路[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 3960-3968.
- WANG Yuxue, CAO Wenbin, HUANG Minghui, et al. Mathematical analysis for zero-mode inrush current of transformer and its equivalent circuit [J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 3960-3968.

杨大业(1984—),男,通信作者,硕士,高级工程师,主要研究方向:新能源并网仿真、输变电工程电磁暂态。E-mail: yangdaye@epri.sgcc.com.cn

宋瑞华(1972—),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统分析和电磁暂态仿真。E-mail: songrh@epri.sgcc.com.cn

项祖涛(1976—),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统分析和电磁暂态仿真。E-mail: xzt@epri.sgcc.com.cn

(编辑 代长振)

Causes and Suppression Measures of Resonant Overvoltage in Offshore Wind Power AC Transmission System

YANG Daye¹, SONG Ruihua¹, XIANG Zutao¹, LIU Dong², CHAO Wujie³, YAN Yuesheng²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Zhejiang Provincial New Energy Investment Group Corporation Limited, Hangzhou 310000, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China)

Abstract: The capacitance per unit length of a cable is 20 times more than that of an overhead line at the same voltage level, and more and more offshore wind power is connected to the grid through AC cable, which reduces the natural resonant frequency of the transmission system and increases the resonant risk of the system. Aiming at the resonant overvoltage phenomenon in the process of grid connection of an offshore wind farm, the fault recording data are analyzed. Based on the impedance model of the transmission system, the mechanism is analyzed, and through the electromagnetic transient simulation, it is verified that the natural resonant frequency near the double frequency of the transmission system is the fundamental reason for the resonant overvoltage caused by the closing operation of no-load transformer and no-load line in the wind farm. Combined with the engineering practice, the joint suppression measures of changing the operation mode of the transmission system, optimizing the control and protection system of the static var generator and increasing the access load are proposed. Finally, the effectiveness of the proposed measures is verified by simulation and field tests.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 5100-202155305A-0-0-00).

Key words: offshore wind power; resonant over-voltage; no-load transformer; no-load transmission line; field test

