

基于阻抗模型的双馈风力发电机高频谐振机理分析

于一鸣, 刘其辉, 董楚然

(华北电力大学新能源国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 针对现在新能源发电领域的双馈风力发电机高频谐振问题展开研究。首先, 通过分析双馈风力发电机的两个变流器控制策略, 可以得到变流器的阻抗模型。其次, 分析各类补偿形式的电网的频率响应曲线, 确定能够发生谐振的并联补偿电网拓扑结构。然后, 通过绘制双馈感应发电机与并联补偿电网的阻抗Bode图, 当两系统的幅值响应交点所对应的相位裕度在 180° 时, 会发生谐振。最终, 在PSCAD中搭建仿真模型进行验证, 仿真结果验证了双馈风力发电机的高频谐振机理分析的合理性和有效性。

[关键词]: 双馈感应发电机; 变流器阻抗模型; 高频谐振; 频谱分析

Analysis of high frequency resonance mechanism of doubly feedback induction generator based on impedance model

YU Yiming, LIU Qihui, DONG Churan

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electrical Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The high frequency resonance of doubly fed-back induction generator (DFIG) in the field of renewable power generation is studied. Firstly, by analyzing the control strategies of two converters, the impedance models of two converters can be obtained respectively. Secondly, by analyzing the frequency response curves of the grid in various compensation forms, the topology of the parallel compensation grid which can generate high frequency resonance is selected. Then, by plotting the impedance Bode diagram of DFIG and the parallel compensation grid, the frequency response margin can be obtained according to the intersection of two impedance magnitude curves when high frequency resonance occur. Finally, the simulation model can be built in PSCAD. The simulation results verifies that the analysis of high frequency resonance mechanism of DFIG has good rationality and effectiveness.

Key words: DFIG; impedance model of converter; high frequency resonance; spectrum analysis

0 引言

近年来, 大容量的风力发电机组接入电网, 给电力系统带来了许多稳定性问题^[1-3], 对于电力系统消纳新能源造成了困难。然而风电场的高

频谐振问题却未受到人们的关注。风电场中存在大量的电力电子元器件, 这些元器件的存在会产生大量的高次谐波, 在一些特定的工况下, 风力发电机会放大这些谐波从而导致风电场发生谐振。例如德国北海风电场, 曾发生过2 930 Hz谐振, 导致换流站电容被烧毁, 无法正常运行。因

国家重点研发计划项目资助 (2018YFB0904000)

此,研究风力发电机并入电网后,风电机组高频谐振特性及其影响趋势具有重要的意义。

目前,国内外学者已对双馈感应发电机(Double Fed-back Induction Generator, DFIG)及风电场的次同步谐振机理进行了大量的研究与实验,但是对DFIG及风电场的高频谐振分析的研究非常少,实际上风电场的高频谐振问题开始显现较为棘手的问题。文献[4]分析了DFIG在不同工况对风场谐振点的影响,但忽略了双馈风电机组两个变流器及其控制策略的影响特性,仅对DFIG的感应发电机部分进行了阻抗分析。文献[5]以丹麦的Horns Rev风电场为例,利用模态分析的方法对风电场的拓扑结构进行了研究,并主要研究了风电场内的电缆对风电场谐振点变化的影响,该文献也未考虑变流器及其控制对谐振点的影响。文献[6]分析了处于弱电网环境下的风电场谐振问题,通过分析建立了长线路的阻抗数学模型,采用模态分析的方法分析了系统各节点谐振参与因子以及元件灵敏度值,对今后风电场设计工作具有一定的参考价值。但是以上文献中并没有阐明风电场发生高频谐振的机理。

为了分析DFIG接入并联补偿电网系统后能否安全稳定运行,本文考虑使用阻抗法来分析高频谐振现象,即通过建立DFIG和并联补偿电网的阻抗模型,利用阻抗法分析DFIG与并联补偿弱电网的交互作用关系,对DFIG的电力系统高频谐振发生机理及其影响趋势进行了研究。首先,通过分析DFIG的动态模型及其控制策略,考虑DFIG的机侧变流器(Rotor Side Convertor, RSC)与网侧变流器(Grid Side Convertor, GSC)的内部阻抗,建立DFIG的阻抗分析模型。其次,利用阻抗法^[7-10]的思路分析DFIG与弱电网之间的交互关系,找出该系统的谐振点。最后,通过研究DFIG谐振发生机理,并在PSCAD中通过仿真进行验证。

1 系统中各元件的阻抗建模

在以往的火力发电与水力发电组成的电力系统中,电力电子元器件的内部阻抗往往被忽略,

但是在新能源电力系统中,存在着大量电力电子元器件,由于并网容量的增加,故电力电子元器件的内部阻抗不可被忽视。

在建立风力发电机的变流器阻抗模型时需要作出如下假设。

1) 假设DFIG两个变流器之间的直流电容电压恒定。两个变流器之间相互独立运行,中间没有耦合关系。

2) 假设两个变流器的控制策略类似。在控制策略中,由于两个变流器的控制目标不同,会导致 dq 轴分量的控制策略不同,在阻抗建模中,会作出一定省略。

3) 假设变流器的解耦项针对基波电流进行设计。因为追踪目标为工频基波电流,忽略谐波影响。

4) 考虑电网的阻抗,并将电网的内阻抗等效为RLC模型。

1.1 弱电网环境下的系统阻抗分析

有一些风机处于长线路的末端,线路的阻抗无法忽略,造成了接入电网较弱,该系统的阻抗可以体现为阻感串联与电容并联的接线方式。如图1所示。

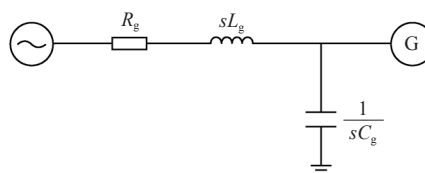


图1 弱电网系统阻抗

Fig. 1 System impedance of the weak grid

图1中, R_g 、 sL_g 和 sC_g 为弱电网的电阻、电感和并联补偿电容,其中 $R_g = R_{line} + R_T$, $sL_g = sL_{line} + sL_T$; R_{line} 、 sL_{line} 为系统线路的阻抗集总参数; R_T 、 sL_T 为变压器阻抗。

电力系统的阻抗 Z_{Net} 可以表示为

$$Z_{Net} = \frac{(sL_g + R_g) \frac{1}{sC_g}}{sL_g + R_g + \frac{1}{sC_g}} \quad (1)$$

将式(1)整理可得

$$Z_{Net} = \frac{\frac{1}{C_g} s + \frac{R_g}{L_g C_g}}{s^2 + \frac{R_g}{L_g} s + \frac{1}{L_g C_g}} \quad (2)$$

由式(2)可得,系统阻抗 Z_{Net} 为二阶函数,其频率响应会在高频区域内产生跃变,由感性变为容性与DFIG的感性阻抗耦合产生谐振。

1.2 网侧变流器阻抗模型

GSC多数采用矢量控制,在变流器的阻抗建模中,只考虑电流内环控制,忽略电压外环与锁相环的控制影响,产生电流计算值的外部控制环路比当前的环路慢很多,带宽在几个赫兹范围内或更低^[7]。因此,考虑DFIG的阻抗特性时一般将电压外环产生的电流参考值作为常数。网侧变流器的电流内环控制如图2所示。

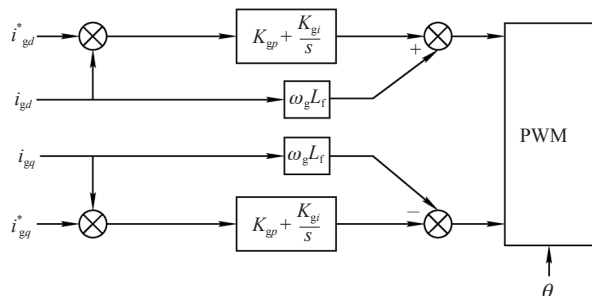


图2 网侧变流器控制策略

Fig. 2 Grid side converter control strategy

图2中, K_{gp} 、 K_{gi} 为网侧变流器PI控制参数; L_f 为变流器支路滤波电感; i_{gd}^* 、 i_{gq}^* 为网侧变流器dq轴电流参考分量; i_{gd} 、 i_{gq} 为网侧变流器dq轴电流分量。

对于图2所示的控制策略,可以列写dq轴的电压与电流的关系式,即

$$u_{gd} = (i_{gd}^* - i_{gd})H_g(s) + K_{gd}i_{gq} \quad (3)$$

$$u_{gq} = (i_{gq}^* - i_{gq})H_g(s) - K_{gd}i_{gd} \quad (4)$$

式中, u_{gd} 、 u_{gq} 为GSC的dq轴电压分量; $H_g(s)$ 为GSC的PI控制器的传递函数; K_{gd} 为GSC控制策略解耦项补偿系数。

根据电流内环的控制框图,将式(3)、式(4)以空间矢量的形式相加,可以写出GSC的输出电压与电流的关系,即

$$V_{gdq} = I_{gdq}^* H_g(s) - [H_g(s) - jK_{gd}]I_{gdq} \quad (5)$$

式中, V_{gdq} 、 I_{gdq} 为dq轴网侧电压、电流矢量; I_{gdq}^* 为网侧电流参考值矢量; $H_g(s)$ 为PI控制器传递函数。

网侧变流器的控制结构图如图3所示。

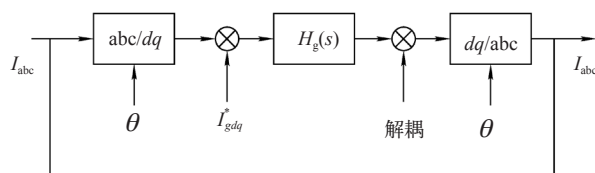


图3 网侧变流器电流控制框图

Fig. 3 Current control block diagram of the grid side converter

图3中,三相电流经过坐标变换、电流控制器、坐标反变换后完成对电流的控制。因为坐标变换不会改变被控对象的大小,所以只有控制器 $H_g(s)$ 与解耦项对电流造成影响,根据式(5)可以在abc静止坐标系中写出电压与电流的关系式,即

$$V = I^* H_g(s - j\omega) - [H_g(s - j\omega) - jK_{gd}]I \quad (6)$$

式中, $H_g(s - j\omega) - jK_{gd}$ 为GSC的阻抗函数; $I^* H_g(s - j\omega)$ 为GSC的受控电压源。

考虑交流侧滤波电感,GSC支路阻抗模型 Z_g 为

$$Z_g = K_{gp} + \frac{K_{gi}}{s} - jK_{gd} + sL_f \quad (7)$$

1.3 机侧变流器与感应发电机阻抗模型

由于直流电容起到了使两个变流器相互解耦的作用,所以可以将RSC与感应发电机当作整体进行考虑。在RSC与DFIG的阻抗模型中,由于DFIG在大部分的时间内运行在非同步速度,存在转差率 $slip(s)$,对于电路分析,可以假定转速恒定,转差率可以表示为 $1 - (\omega_m/\omega)$, ω_m 为转子角速度, ω 为系统角频率。转差率在频域中可以表示为

$$slip(s) = \frac{s - j\omega_m}{s} \quad (8)$$

机侧变流器的采用电网电压定向矢量控制,变流器dq轴电压控制指令为

$$u_{td} = R_r i_{td} + \sigma L_r \frac{di_{td}}{dt} - \omega_s \left(-\frac{L_m}{\omega L_s} + \sigma L_r i_{tq} \right) \quad (9)$$

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s \sigma L_r i_{rd} \quad (10)$$

式中, u_{rd} 、 u_{rq} 为 dq 坐标系下转子侧电压分量; L_r 、 R_r 为转子电感与转子电阻; ω_s 为同步角频率; σ 为发电机漏磁系数; L_s 为定子电感。

在实际的运行状态下,变流器的 dq 轴电压指令解耦项大小差别不大,故可以假设 dq 轴的解耦项相同,令 $K_{rd} = \omega_s \sigma L_r i_{rq} = \omega_s \sigma L_r i_{rd}$ 。与GSC的建模类似,RSC的建模采用相同的思路,可以得到RSC的阻抗模型为 $H_r(s-j\omega) - jK_{rd}$, $H_r(s-j\omega)$ 为转子变流器PI传递函数, K_{rd} 为转子控制策略解耦系数。将RSC的阻抗进行频率与绕组折算后可得

$$Z_{RSC} = \frac{N_s^2}{N_r^2} \frac{H_r(s-j\omega) - jK_{rd}}{\text{slip}(s)} \quad (11)$$

DFIG的主电路如图4所示。其中, R_s 、 R_r 为发电机定转子绕组电阻; L_{os} 、 L_{or} 为发电机定转子绕组漏感; L_m 为励磁电感。

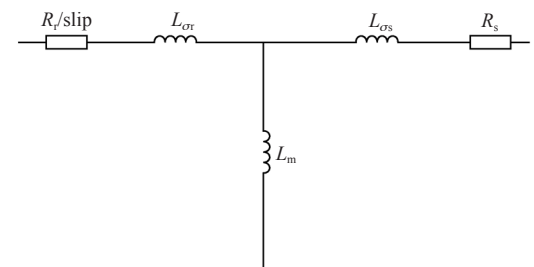


图4 DFIG主电路

Fig. 4 The main circuit of DFIG

主电路的阻抗关系经常无法满足 $L_{or} \approx L_{os} \ll L_m$ 的约束条件,故励磁电感不能忽略。转子绕组与RSC支路串联并且考虑励磁支路,经过折算,从DFIG定子端子可以得到RSC与感应发电机的阻抗模型

$$Z_{sr} = R_s + sL_{os} + (L' + R'_r + Z_{RSC}) \parallel L_m \quad (12)$$

$$\text{其中, } L'_{or} = s \frac{N_s^2}{N_r^2} L_{or}, \quad R'_r = \frac{N_s^2}{N_r^2} \frac{R_r}{\text{slip}}。$$

1.4 双馈并网系统阻抗

在前文中,通过对控制策略的分析分别建立了GSC与RSC-DFIG的阻抗模型。由于直流电容的解耦作用,可以将GSC与RSC感应发电机两条支路单独考虑,认为两条支路为并联关系。

如图5所示,双馈并网系统整体阻抗模型为

$$Z_{DFIG} = Z_g \parallel Z_{sr} \quad (13)$$

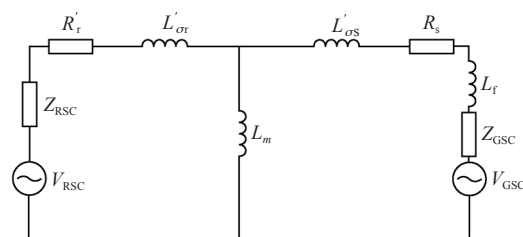


图5 DFIG整体阻抗模型

Fig. 5 The overall DFIG impedance model

建立起双馈并网系统的阻抗模型后,可以通过绘制其Bode图并对其阻抗特性进行研究。

2 DFIG的高频谐振机理分析

文献[7-12]中,在产生次同步谐振(Sub-Synchronous Resonance, SSR)时,对于DFIG与串联补偿电网的相互作用,被称为次同步控制相互作用(Sub-Synchronous Control Interaction, SSCI),通过分析DFIG与电网阻抗系统的幅值响应交点频率下的相位响应,如相位差达到 180° ,则两个系统可能会发生谐振^[13]。DFIG与并联电网的交互作用如图6所示。

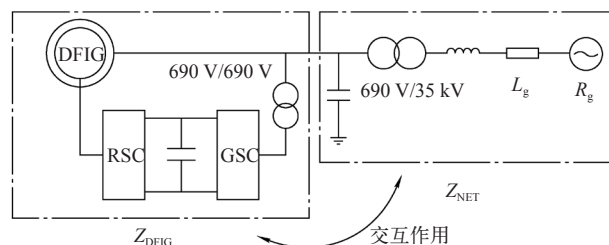


图6 DFIG与并联电网交互作用

Fig. 6 The interaction between the DFIG and parallel compensated grid

对于内部阻抗为纯电感的电网来说,在整个频率范围内,其相位响应不会做出大的改变,接近于 $+90^\circ$,电网与双馈并网系统的阻抗相位差不能满足发生谐振的条件。对于RLC串联补偿网络,DFIG与串联补偿网络在高频下的相位响应相同,都呈现电感性,故不会发生高频谐振^[11,13]。但是在并联补偿电网阻抗形式下,却可以满足DFIG与电网阻抗交互作用而发生高频谐振的条件。

图7为不同电网阻抗形式的Bode图，电网的阻抗形式为串联电容补偿、并联电容补偿和无补偿，DFIG在高频（ $>1\text{ kHz}$ ）时的相位响应为 90° ，呈现电感特性；因此，DFIG发生高频谐振时，弱电网在高频区域内的相位响应该为 -90° ，表现为电容性，DFIG与电网阻抗的相位差值接近 180° 。

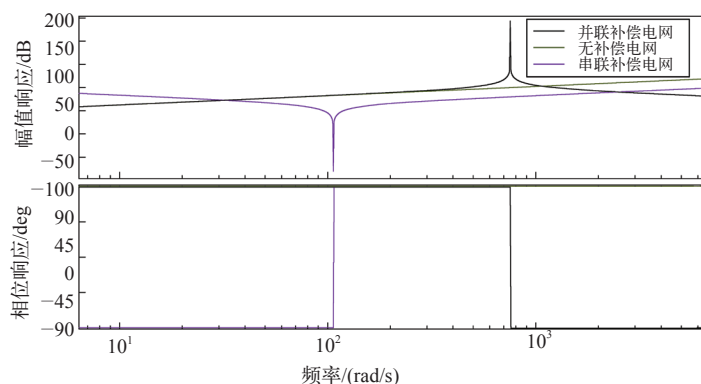


图7 不同电网阻抗形式的Bode图

Fig. 7 Bode diagram of different forms of power grid impedance

图8为DFIG两条支路的阻抗模型和整体阻抗模型，图8中分别画出 Z_{sr} 、 Z_g 和 Z_{DFIG} 的阻抗Bode图。 Z_g 在低频区域内体现为正阻抗特性，在文献[14]中，分析次同步谐振时建立的DFIG阻抗模型往往忽略GSC支路，仅考虑有负阻抗效应的 Z_{sr} ，但是在高频谐振分析时，为了准确找到谐振点，需要在DFIG的阻抗模型中考虑 Z_g 。从图8中可以看出，DFIG的阻抗Bode图在 $50 \sim 150\text{ Hz}$ 的频率范围内呈现电容性，在 $0 \sim 50\text{ Hz}$ 与 150 Hz 以上的频率范围内呈现电感性。

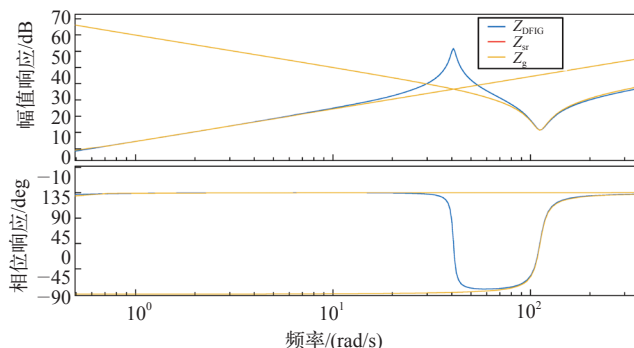
图8 Z_{DFIG} 、 Z_{sr} 和 Z_g 的阻抗Bode图Fig. 8 The impedance Bode diagram of Z_{DFIG} , Z_{sr} and Z_g

图9为不同补偿容量的并联电容补偿电网与

双馈并网系统的阻抗Bode图。从图9中可以看出，电网谐振峰的变化主要受电网电容 C 与电网电感 L 的影响，本文中假设电感 L 为不变量，补偿电容可变化。在幅值特性中使弱电网阻抗的谐振峰受电容影响发生偏移。此时，由图9可知，双馈并网系统与并联补偿电网的左侧交点集中在 60 Hz 附近，两系统相位响应为 90° 和 -75° ，不构成发生谐振的条件；右侧交点 $2\ 350\text{ Hz}$ 、 $3\ 180\text{ Hz}$ 和 $4\ 620\text{ Hz}$ 时两系统的相位响应为 90° 和 -90° ，可能会发生谐振。

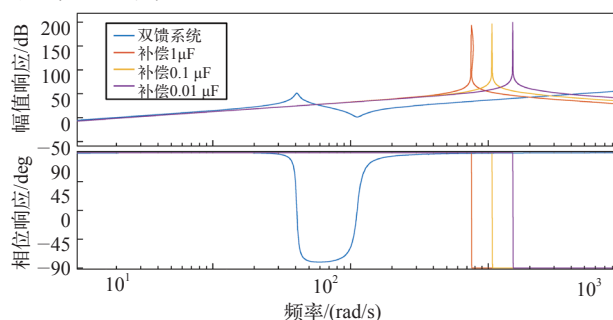


图9 DFIG与不同补偿电容阻抗Bode图

Fig. 9 DFIG Bode diagram of different compensated capacitance impedance

图10为DFIG与并联补偿电网阻抗Bode图。电网阻抗与DFIG的阻抗的交点在 $2\ 350\text{ Hz}$ ，此时，DFIG的阻抗特性为感性阻抗，相位趋近 90° ，电网阻抗为容性阻抗，相位趋向于 -90° ，在该频率附近会发生谐波谐振。

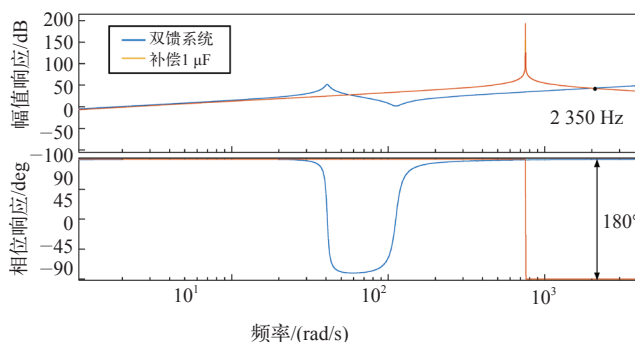


图10 DFIG与并联补偿电网阻抗交互作用图

Fig. 10 DFIG interaction diagram with the compensated power grid impedance

3 仿真实验

为了验证所建立阻抗模型的合理性以及理

论分析的正确性，在PSCAD中搭建了如图6所示的风电并网系统的DFIG仿真模型。DFIG采用1.5 MW的容量，机端电压为690 V，开关频率为1 600 Hz，DFIG仿真参数如表1所示，并联补偿电网的仿真参数如表2所示。在电网中加入2 350 Hz的1 A谐波电流，通过观察DFIG机端输出电流的波形及其电流的频谱分析，可以验证当电网中含有2 350 Hz谐波电流时，DFIG发生了高频谐振，经过风机与电网的交互作用，谐波电流被放大。

表1 DFIG仿真参数

Tab. 1 DFIG simulation parameters	
参数名称	参数大小
$R_s/\text{m}\Omega$	7
$R_r/\text{m}\Omega$	7.2
K_{rp}	1.933
K_{rd}	0.5
K_{rd}	0.023
L_{os}/mH	0.4
L_{or}/mH	0.45
L_m/mH	14
N_s	1
N_r	3
$\omega_m/(\text{rad/s})$	40
K_{gp}	1.3
K_{gl}	10 000
K_{gl}	0.042
L_f/mH	80

表2 并联补偿电网仿真参数

Tab. 2 Parallel compensation network simulation parameters	
参数名称	参数大小
$R_g/\text{m}\Omega$	30
$C_g/\mu\text{F}$	2
L_g/mH	200
X_T/mH	60
$R_T/\text{m}\Omega$	12
X_L/mH	140
$R_L/\text{m}\Omega$	18

图11~图13分别为正常状态下DFIG三相电流波形、输出电流谐波含量和输出功率。在正常的运行状态下，DFIG输出的电流趋近于正弦，对其电流进行频谱分析可以看出，仅在63次谐波处出现微量谐波，该谐波是由于开关频率所引起的。风机的输出功率平滑稳定。

在电网中加入谐波后，DFIG发生了高频谐振，从图14所示的输出电流波形中能够看到明显

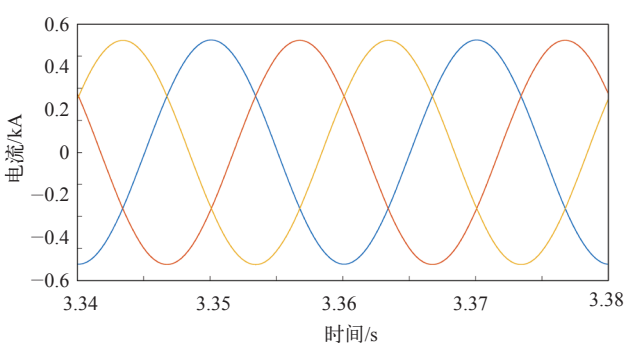


图11 正常状态下DFIG三相电流波形

Fig. 11 The three-phase current waveform of DFIG under normal state

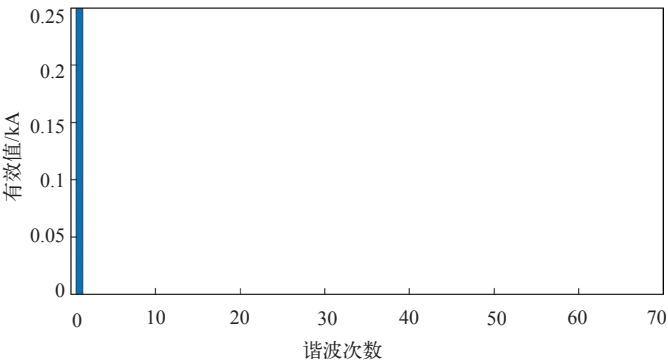


图12 正常工况下的DFIG输出电流谐波含量

Fig. 12 The output current harmonic content of DFIG under normal working conditions

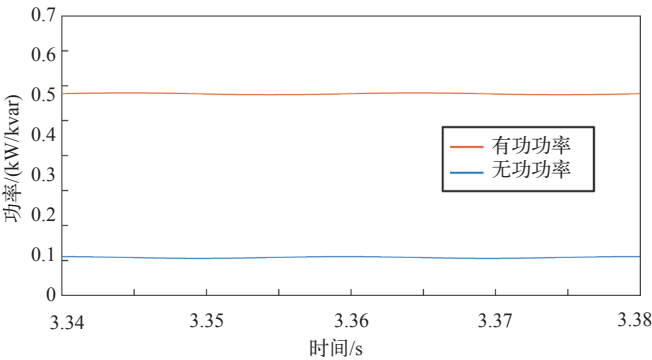


图13 正常状态下DFIG输出功率

Fig. 13 The output power of DFIG under normal state

的畸变，从频谱分析中可以看出，在47次谐波处出现大量谐波，其有效值为0.1 kA，对外电网中的谐波有了明显的放大，风机的输出在谐振状态下很不稳定，输出功率不平滑。图15为发生谐振时DFIG的A相电流输出电流谐波含量，图16为谐波环境下的DFIG输出功率。

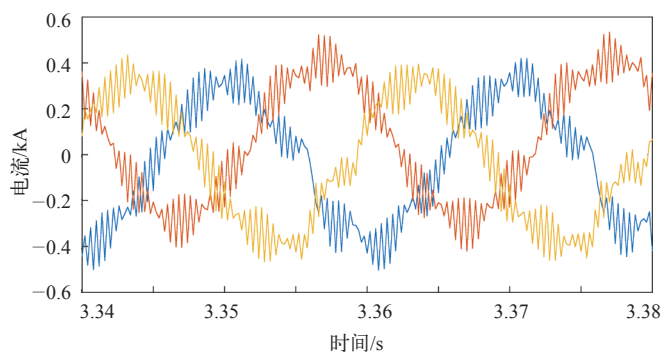


图14 DFIG输出电流谐波含量

Fig. 14 The output current harmonic content of DFIG

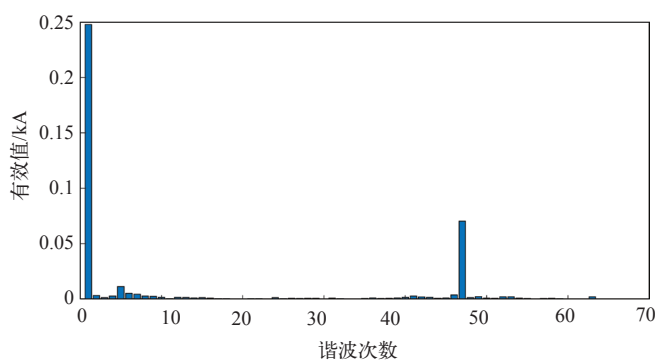


图15 发生谐振时DFIG的A相电流输出电流谐波含量

Fig. 15 The output current harmonic content of DFIG when resonance occurs

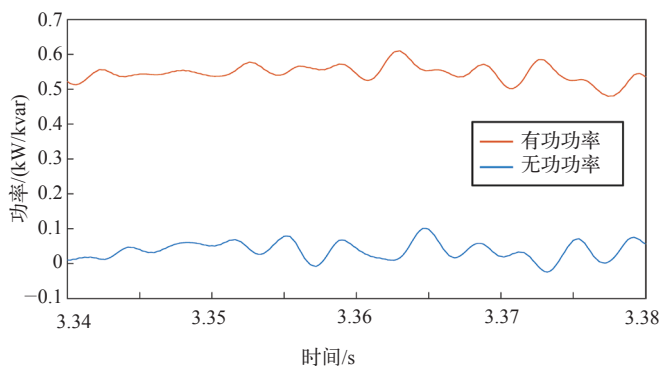


图16 谐波环境下的DFIG输出功率

Fig. 16 The output power of DFIG under harmonic environment

4 结束语

为了分析DFIG并网系统产生高频谐振的原因,首先通过列写DFIG的空间矢量方程可以将变流器等效为电压源与阻抗串联的方程,经过空间矢量方程建立GSC与RSC的变流器阻抗模型,与DFIG结合后得到双馈并网系统的阻抗模型;其次,通过分析各种形式的电网阻抗频率响应关

系,可以确定仅有并联补偿的弱电网可以发生高频谐振。最后,经过分析与仿真验证后,可以得知DFIG发生高频谐振的理论分析与仿真结果相同,由仿真结果可以得出结论,DFIG产生高频谐振是由于DFIG与电网的阻抗发生了交互作用。本文中分析所获得的结论对于DFIG稳定运行具有重要的意义,对于分析风电场在各频率段下的稳定运行具有一定的工程实用价值。

参考文献

- [1] 肖湘宁, 罗超, 廖坤玉. 新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 85-97.
XIAO Xiangning, LUO Chao, LIAO Kunyu. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy Sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 85-97.
- [2] 徐政, 罗惠群, 祝瑞金. 电力系统次同步振荡问题的分析方法概述 [J]. 电网技术, 1999, 23(6): 36-39.
XU Zhen, LUO Huiqun, ZHU Ruijin. Review on methods of analysis for subsynchronous oscillations of power system[J]. Power System Technology, 1999, 23(6): 36-39.
- [3] 王伟胜, 张冲, 何国庆, 等. 大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1050-1060.
WANG Weisheng, ZHANG Chong, HE Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1050-1060.
- [4] 戎骏, 胡海涛, 邵洋, 等. 基于敏感度分析的海上风电场谐波谐振研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2510-2517.
RONG Jun, HU Haitao, SHAO Yang, et al. Harmonic resonance assessment for offshore wind farm based on sensitivity analysis[J]. Power System

- Technology, 2016, 40(8): 2510-2517.
- [5] 段庚勇, 冯琳, 李国杰. 考虑集电网结构的海上风电场谐振研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22), 1-11.
- DUAN Gengyong, FENG Lin, LI Guojie. Research on resonance of offshore wind farm considering electricity collection system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 1-11.
- [6] 唐振东, 杨洪耕, 马晓阳, 等. 偏远地区风电场的并网谐振现象分析[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1415-1421.
- TANG Zhendong, YANG Honggeng, MA Xiaoyang, et al. Analysis on grid-connected resonance of wind farm in remote areas[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1415-1421.
- [7] VIETO I, SUN J. Impedance modeling of doubly-fed induction generators[C]. Power Electronics and Applications, 2015: 1-10.
- [8] VIETO I, SUN J. Damping of subsynchronous resonance involving type-III wind turbines[C]. Control Modeling Power Electronics, 2015: 1-8.
- [9] VIETO I, SUN J. Small-signal impedance modelling of type-III wind turbine[C]. Power Energy and Society General Meeting, 2015: 1-5.
- [10] VIETO I, SUN J. Real-time simulation of subsynchronous resonance in type-III wind turbines[J]. Control Modeling Power Electronics, 2014: 1-8.
- [11] MIAO Zhixin. Impedance-model-based SSR analysis for type 3 wind generator and series-compensated network[J]. IEEE Transition on Energy Convers, 2012, 27(4): 984-991.
- [12] PIYASINGHE L, MIAO Zhixin, KHAZAEI J, et al. Impedance model-based SSR analysis for TCSC compensated type-3 wind energy delivery systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 179-187, 2015.
- [13] 远坂俊昭. 锁相环PLL电路设计与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] FAN Lingling, MIAO Zhixin. Nyquist-stability-criterion-based SSR explanation for type-3 wind generators[J]. IEEE Transition on Energy Conversion, 2012, 27(3): 807-809.
- [15] 谢小荣, 王路平, 贺静波, 等. 电力系统次同步谐振/振荡的形态分析[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1043-1049.
- XIE Xiaorong, WANG Luping, HE Jingbo, et al. Analysis of subsynchronous resonance/oscillation types in power systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1043-1049.

作者简介



于一鸣

于一鸣 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为风力发电建模与控制。

刘其辉 (1974-), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为风力发电建模与控制。

(收稿日期: 2018-11-05) **EA**