

# 双馈风电场等值阻抗模型在高频振荡研究中的适用性分析与评价

甘繁欣, 郭春义\*, 程浩, 谭尚晨, 杜东冶

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

## Analysis and Evaluation of the Applicability of Doubly-fed Wind Farm Equivalent Impedance Model in High Frequency Resonance Research

GAN Fanxin, GUO Chunyi\*, CHENG Hao, TAN Shangchen, DU Dongye

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** In the current studies on high frequency resonance of wind farm, the equivalent impedance model is generally used for wind farm. However, there is a lack of analysis and evaluation of the applicability of the equivalent impedance model in the high frequency band. In order to solve this problem, this paper establishes a detailed high frequency impedance model of the wind farm, which includes doubly-fed wind turbines, cables at the exit of the links and collector lines between wind turbines. Then, the wind farm equivalent high frequency impedance model is established by aggregating the wind farm by means of conventional equivalent method. Furthermore, this paper evaluates the consistency between the equivalent and detailed high frequency impedance model of wind farm with different key parameters such as control delay, current inner loop control, grid-side filter of different wind turbines on the same link, and studies the influence of considering or ignoring the collector lines between wind turbines on the applicability of the equivalent high frequency impedance model, based on two indexes: the relative error of resonance frequency and the root mean square error of high frequency phase. The results show that the collector lines between wind turbines have a great influence on the applicability of high frequency equivalent model. However, the difference of key parameters of different wind turbines on the same link has little influence on the applicability of high frequency equivalent model after considering the influence of collector lines between wind turbines. Finally, this paper establishes the model of doubly-fed wind farm on the

PSCAD/EMTDC simulation platform and verifies the correctness of the theoretical analysis. The conclusions of this paper can provide a reference basis for the applicability of the equivalent model for the study of high frequency resonance in large-scale wind farms.

**KEY WORDS:** doubly-fed wind farm; wind farm equivalent model; high frequency resonance; applicability evaluation

**摘要:** 目前在对风电场高频振荡的研究中, 风电场普遍采用等值阻抗模型, 然而对于等值阻抗模型在高频段的适用性需要进一步分析与评价。针对这一问题, 该文以双馈风电场为例, 首先建立风电场中包含双馈风电机组、链路出口处电缆与风电机组间集电线路的链路详细高频阻抗模型。然后, 采用常规等值方法聚合风电场, 获得等值高频阻抗模型。进而, 在同一链路不同风电机组之间控制延时、电流内环控制参数、网侧滤波器等关键参数存在差异的场景下, 采用振荡频率相对误差、高频段相位均方根误差两个指标综合评价等值与详细风电场高频阻抗模型的一致性, 并研究考虑与忽略风电机组间集电线路对等值高频阻抗模型适用性的影响。结果表明, 风电机组间集电线路对风电场等值高频阻抗模型的适用性有较大影响; 然而, 在考虑风电机组间集电线路的影响后, 同一链路不同风电机组的关键参数存在差异时对风电场等值高频阻抗模型的适用性影响较小。最后, 在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建双馈风电场的仿真模型, 通过仿真验证理论分析的正确性。文章所得结论可以为研究规模化风电场高频振荡现象提供等值模型的适用性参考依据。

**关键词:** 双馈风电场; 风电场等值模型; 高频振荡; 适用性评价

基金项目: 国家自然科学基金项目(52277093)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52277093).

## 0 引言

随着能源危机和气候变暖问题日渐加剧, 以风

电为代表的清洁能源迅速发展,已经成为全球可再生能源发展的主要形式<sup>[1-3]</sup>。然而近几年来,风电场高频振荡现象频发,对电力系统的安全稳定运行造成影响<sup>[4-5]</sup>。2013年2月和4月,新疆和广东某风电场分别出现了20次和13次谐波振荡,区域内风电机组大范围跳闸停机<sup>[6]</sup>;2021年5月,冀北某风电场出现了50次左右的谐波振荡,造成风电场并网母线电压波形严重畸变,导致无功补偿装置闭锁次数超限跳闸,风电场高频振荡问题已经严重威胁到规模化新能源的消纳。

目前,在风电场高频振荡问题的研究中,阻抗分析法的应用较为广泛<sup>[7]</sup>。然而,如果对风电场阻抗网络进行详细建模,需要消耗大量计算资源,在更大规模的风电场以及考虑多个区域风电场的场景下,阻抗建模的难度和复杂度将进一步增加。因此,在研究大型风电场与其他系统交互引发高频振荡问题时,大多采用聚合后的等值阻抗模型来降低建模难度和复杂度。文献[8-10]保留了链路出口处的集电线路,将单条链路的风电机群等值为一台风电机组,然而未考虑风电机组间集电线路的影响;文献[11-17]则忽略了链路出口处的集电线路及风电机组间集电线路,将风电机组等值为单台风电机组进行分析。上述文献在建立风电场等值阻抗模型的过程中均忽略了风电机组间集电线路对高频振荡现象的影响,且没有对这种简化的合理性进行论证。

此外,在研究中,通常假设风电场内各台风电机组型号甚至参数均相同。然而在实际工程中,风电机组的参数存在随运行工况而发生变化的情况<sup>[18-19]</sup>。这样的强假设条件对等值阻抗模型适用性的影响值得进一步研究。文献[20]提出一种参数稳定域分析方法,并研究了风电场内风机参数的差异

性对单机等值模型建立的影响,但主要针对直流电压动态时间尺度进行分析;文献[21]从系统振荡特性及关键特征根两方面入手,提出接入弱电网的直驱风电场满足单机等值的判据,并利用蒙特卡洛仿真的方法研究了风机参数存在差异时直驱风电场单机等值的有效性,但分析结果缺少理论论证。上述文献主要基于模式分析法研究等值模型的适用性,且主要针对较低频段,未考虑对风机高频特性影响较大的参数的差异性。研究表明,单台风电机组高频特性受控制延时、电流内环比例常数、滤波器参数的影响<sup>[22]</sup>,风电场等值阻抗模型能否描述上述参数存在差异时详细风电场的高频特性暂未可知。

综上所述,考虑风电机组间集电线路的影响,并考虑风机参数的差异性后,等值模型在研究高频振荡现象的适用性如何,亟需开展定量的评价。然而,现有文献并未涉及风电场等值阻抗模型在高频振荡研究中的适用性分析与评价。

为此,本文以国内某双馈风电场为例,在建立风电场详细高频阻抗模型的基础上,采用常规等值方法聚合风电场,获得等值高频阻抗模型。进而,在同一链路不同风电机组之间关键参数存在差异的场景下,采用振荡频率相对误差、高频段相位均方根误差两个指标综合评价等值与详细风电场高频阻抗模型的一致性,并研究考虑与忽略风电机组间集电线路对等值高频阻抗模型适用性的影响。最后,通过仿真验证了理论分析的正确性。

## 1 双馈风电场的系统结构和参数

本文参考国内某双馈风电场的拓扑结构及参数,建立了含60台2MW双馈风力发电机组(doubly-fed induction generator, DFIG)的风电场,图1为双

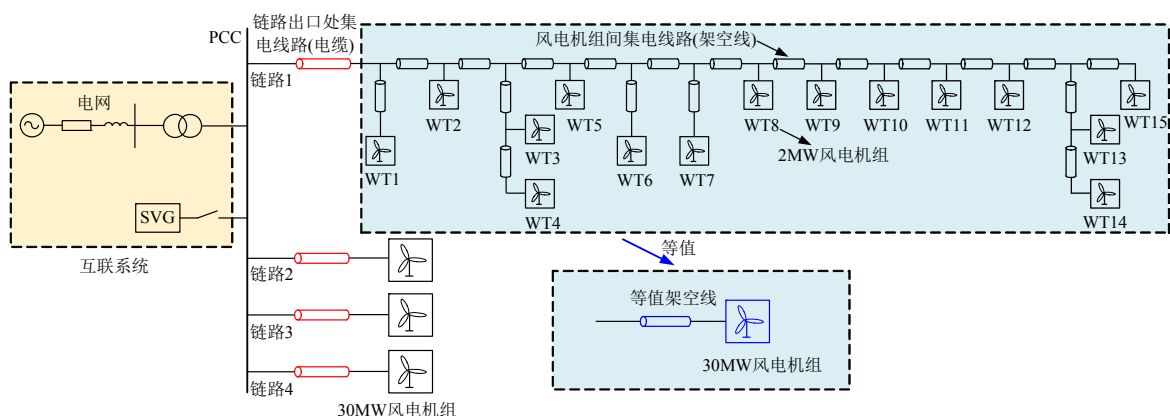


图1 双馈风电场拓扑结构图

Fig. 1 Topological structure diagram of doubly-fed wind farm

馈风电场的拓扑结构图。风电场内每台风电机组额定容量为 2MW，额定风速为 11.6m/s，风电机组通过 0.69/38.5kV 的升压变压器连接到风电场集电线路，再通过 38.5/220kV 升压变压器接入 220kV 交流电网，风电场汇集母线处配置了补偿无功功率的静止无功发生器(static var generator, SVG)，场内各设备参数见附录 A 所示。

风电场由 4 条链路组成，本文针对链路 1 详细建模来进行适用性分析，同时为降低分析的复杂性并保留风电场的特性，其余 3 条链路均进行等值，将每条链路的 15 台 2MW 风电机组等值为 1 台 30MW 风电机组。

## 2 双馈风电场的详细高频阻抗模型

本节建立了包含风电机组和集电线路的链路详细高频阻抗模型，以及交流网络、SVG 的高频阻抗模型。

### 2.1 单台双馈风电机组高频阻抗模型

双馈风电机组的拓扑结构及控制框图<sup>[13-14]</sup>如附录 A 所示，双馈风电机组的网侧变流器(grid-side convertor, GSC)和转子侧变流器(rotor-side converter, RSC)通过直流电压耦合，直流电压由 GSC 控制。直流电压的控制时间尺度一般在 1~10Hz<sup>[14]</sup>，而风电场高频振荡在几百到几千 Hz，所以在研究高频振荡时，可以认为直流电压恒定，两个变流器互相解耦。因此，风电机组阻抗可以看成由网侧变流器阻抗与转子侧变流器阻抗并联而成。

由于功率外环和电压外环的控制带宽一般低于 100Hz<sup>[23]</sup>，对于高频几乎没有影响，因此，变流器的高频阻抗模型中忽略了外环控制。本文参考文献[15, 24]的建模方法，双馈风电机组网侧部分的高频阻抗为

$$Z_{Gside} = \frac{sL_f + Z_{gN}[k_{gp} + k_{gi}/(s - j\omega_0)]e^{-sT_{gs}}}{1 - e^{-sT_{gs}}} // \frac{1}{sC_f} \quad (1)$$

式中： $Z_{gN}$  为 GSC 的阻抗基准值； $k_{gp}$  与  $k_{gi}$  分别为 GSC 的电流内环比例系数和积分系数； $T_{gs}$  为 GSC 的控制延时； $\omega_0$  为电网角速度； $C_f$  为 LC 滤波器电容； $L_f$  为 LC 滤波器电感；//表示并联。

双馈风电机组转子侧部分的阻抗包括 RSC 和感应电机等效阻抗，其结构如图 2 所示，RSC 的高频阻抗为

$$Z_{RSC} = Z_{rN}[k_{rp} + k_{ri}/(s - j\omega_0)]e^{-sT_{rs}} \quad (2)$$

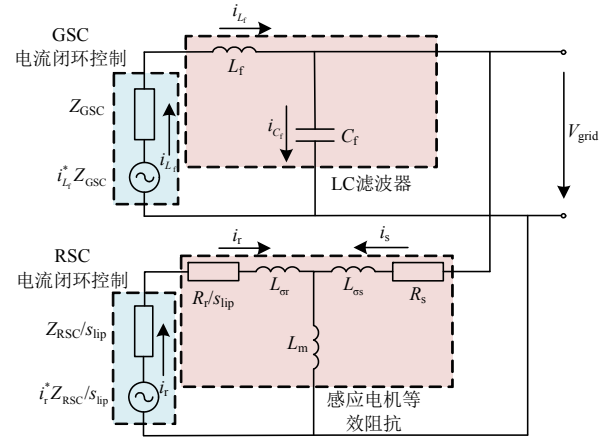


图 2 双馈风电机组阻抗模型

Fig. 2 Impedance model of DFIG

式中： $Z_{rN}$  为 RSC 的阻抗基准值； $k_{rp}$  与  $k_{ri}$  分别为 RSC 的电流内环比例系数和积分系数； $T_{rs}$  为 RSC 的控制延时。

双馈风电机组转子侧部分的高频阻抗为

$$Z_{Rside} = \frac{sL_m A + (R_s + sL_{\sigma s})A + sL_m (R_s + sL_{\sigma s})}{sL_m + A} \quad (3)$$

式中： $R_r$  为转子电阻； $L_{\sigma r}$  为转子漏感； $R_s$  为定子电阻； $L_{\sigma s}$  为定子漏感； $L_m$  为互感； $A=(R_r + Z_{RSC})/s_{lip} + sL_{\sigma r}$ ， $s_{lip}$  为转差率的频域表示，且  $s_{lip}=(s-j\omega_t)/s$ ， $\omega_t$  为转子角速度。

风电机组高频阻抗由网侧变流器阻抗与转子侧变流器阻抗并联而成，因此单台双馈风电机组的高频阻抗为

$$Z_{wf} = k^2 Z_{Gside} // Z_{Rside} + sL_{st} \quad (4)$$

式中： $L_{st}$  为机端升压变压器的等效电感； $k=38.5/0.69$ 。

### 2.2 单条链路高频阻抗模型

对链路集电线路进行精确阻抗建模是研究链路高频阻抗模型的关键。本文对集电线路的建模采用  $\pi$  型电路，文献[25]给出了在满足精度需求下模拟传输线路特性的  $\pi$  型电路级联数目与线路长度的关系，由于本文实际风电场内集电线路均小于 5km，根据上述文献计算方法可知，对集电线路建模采用单个  $\pi$  型电路即可。

图 3 为链路 1 的阻抗示意图，根据电路理论，可以推出链路末端导纳  $Y_{j1}$  为

$$Y_{j1} = [(Y_{wf} + Y_{l1}/2)^{-1} + Z_{l1}]^{-1} + Y_{l1}/2 \quad (5)$$

式中： $Z_{l1}=R_{l1}+sL_{l1}$ ， $R_{l1}$  为线路  $l_1$  的电阻， $L_{l1}$  为线路  $l_1$  的电感； $Y_{l1}=sC_{l1}$ ， $C_{l1}$  为线路  $l_1$  的电容； $Y_{wf}=1/Z_{wf}$ 。同理，可得：

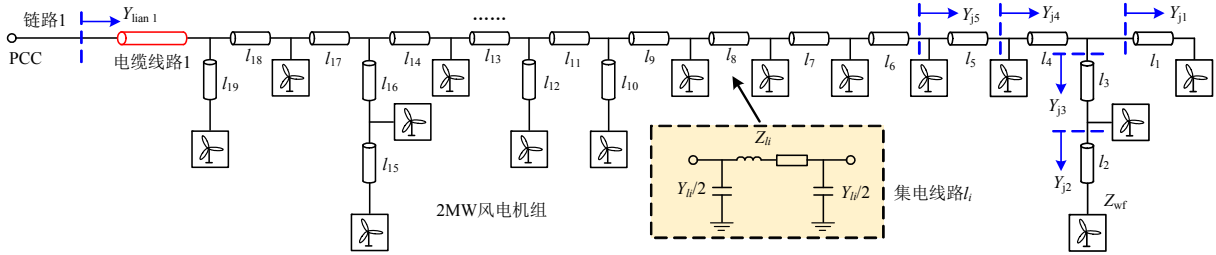


图3 链路1的阻抗示意图

Fig. 3 Impedance diagram of link 1

$$Y_{j2} = [(Y_{wf} + Y_{l2}/2)^{-1} + Z_{l2}]^{-1} + Y_{l2}/2 \quad (6)$$

$$Y_{j3} = [(Y_{j2} + Y_{wf} + Y_{l3}/2)^{-1} + Z_{l3}]^{-1} + Y_{l3}/2 \quad (7)$$

$$Y_{j4} = [(Y_{j1} + Y_{j3} + Y_{l4}/2)^{-1} + Z_{l4}]^{-1} + Y_{l4}/2 + Y_{wf} \quad (8)$$

以此类推, 可得链路1的高频阻抗为

$$Z_{lian1} = 1/Y_{lian1} \quad (9)$$

### 2.3 SVG 高频阻抗模型

SVG 的拓扑结构与控制框图如图4所示。由于外环、锁相环对高频的影响不大, 因此, 对 SVG 的高频阻抗建模仅考虑电流内环控制<sup>[26-27]</sup>, 其高频阻抗可以表示为

$$Z_{SVG} = \frac{sL_s + Z_{sN}[k_p + k_i/(s - j\omega_0)]e^{-sT_{ds}}}{1 - e^{-sT_{ds}}} \quad (10)$$

式中:  $Z_{sN}$  为 SVG 的阻抗基准值;  $L_s$  为滤波电感;  $k_p$  和  $k_i$  分别为电流内环比例系数和积分系数;  $T_{ds}$  为控制延时。

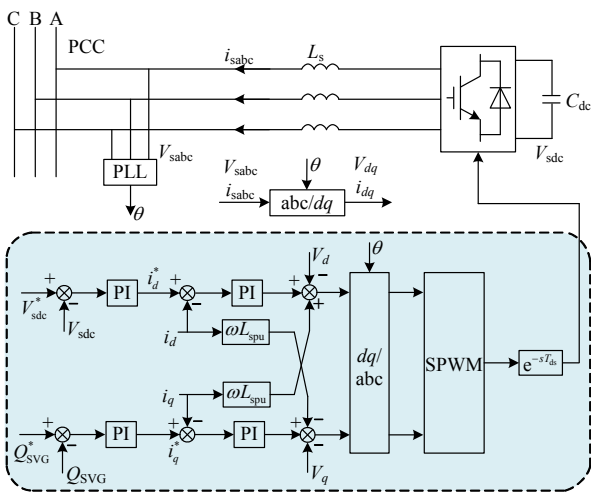


图4 SVG 的拓扑结构与控制框图

Fig. 4 Topological structure and control block diagram of SVG

### 2.4 主变压器与电网等效阻抗模型

主变压器与电网等效阻抗的表达式为

$$Z_{hulian} = sL_t + R_h + sL_h \quad (11)$$

式中:  $L_t$  为 38.5/220kV 主变压器的等效电感;  $R_h$

和  $L_h$  为电网等效电阻和电感。

以上研究给出了双馈风电机组、单条链路、SVG、主变压器与电网等效阻抗的高频阻抗模型, 根据串并联关系可以建立双馈风电场的详细高频阻抗模型。为方便后续研究, 将交流网络及 SVG 称为互联系统, 用来分析高频振荡现象。

## 3 双馈风电场的等值高频阻抗模型

2 节建立了包含风电机组和集电线路的单条链路详细高频阻抗模型, 可见, 若对风电场阻抗网络进行详细建模, 需要消耗大量计算资源, 因此, 本节通过容量加权法<sup>[28]</sup>和等功率损耗法<sup>[29]</sup>将风电机组及风电机组间集电线路进行参数聚合, 获得风电场等值高频阻抗模型。

### 3.1 风电机组的等值高频阻抗模型

由于风电机组的输出功率对高频阻抗影响不大<sup>[8]</sup>, 因此本文假设所有风电机组都运行在额定工况, 将单条链路的风电机群等值为一台风电机组。根据容量加权法<sup>[28]</sup>, 风电机组等值参数(有名值)的计算方法如下:

1) 风电机组阻抗基准值、定转子绕组电阻和电感:

$$\begin{cases} R_{req} = R_r/r \\ R_{seq} = R_s/r \\ L_{meq} = L_m/r \\ L_{\sigma req} = L_{\sigma r}/r \\ L_{\sigma seq} = L_{\sigma s}/r \\ Z_{gNeq} = Z_{gN}/r \\ Z_{rNeq} = Z_{rN}/r \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $r$  为同群的风电机组数量; 下标 eq 表示等值后的参数。

2) 机端升压变压器的等效电感:

$$L_{steq} = L_{st}/r \quad (13)$$

3) 网侧 LC 滤波器参数:

$$\begin{cases} L_{\text{feq}} = \frac{L_f}{r} \\ C_{\text{feq}} = rC_f \end{cases} \quad (14)$$

综上，将式(12)–(14)代入式(1)–(4)中，可得风电机组等值高频阻抗  $Z_{\text{wfeq}}$  为

$$Z_{\text{wfeq}} = Z_{\text{wf}}/r \quad (15)$$

### 3.2 风电机组间集电线路的等值高频阻抗模型

本文对集电线路的等值采用等功率损耗法<sup>[29]</sup>，以等值前后集电线路的损耗不变为原则。以图 5 所示的包含放射式与干线式集电线路为例，详细模型与等值模型的功率损耗为

$$\begin{cases} \Delta S_{\text{详细}} = I_1^2 Z_1 + I_2^2 Z_2 + (I_2 + I_3)^2 Z_3 + (\sum_{i=1}^3 I_i)^2 Z_4 + \\ (\sum_{i=1}^4 I_i)^2 Z_5 + (\sum_{i=1}^5 I_i)^2 Z_6 = (P_1 / (\sqrt{3}U))^2 Z_1 + \dots \quad (16) \\ \Delta S_{\text{等值}} = I_{\text{eq}}^2 Z_{\text{eq}} = (\sum_{i=1}^5 I_i)^2 Z_{\text{eq}} = (\sum_{i=1}^5 P_i / (\sqrt{3}U))^2 Z_{\text{eq}} \end{cases}$$

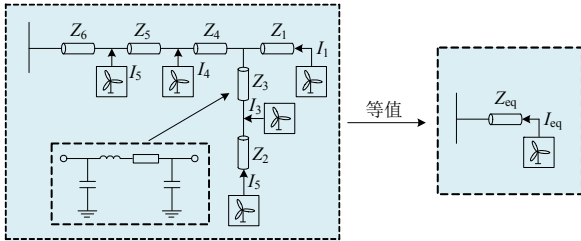


图 5 集电线路等值案例

Fig. 5 Equivalent case of collector lines

根据等值前后集电线路损耗不变的原则，可得集电线路的等值高频阻抗为

$$Z_{\text{eq}} = \frac{\Delta S_{\text{详细}}}{I_{\text{eq}}^2} = \frac{P_1^2 Z_1 + P_2^2 Z_2 + \dots + (\sum_{i=1}^5 P_i)^2 Z_6}{(\sum_{i=1}^5 P_i)^2} \quad (17)$$

对于集电线路电容的等值，则在忽略电压差异的基础上，认为等值电容为等值前集电线路的电容之和<sup>[28]</sup>。

### 3.3 链路等值高频阻抗模型

根据 3.1、3.2 节所建风电机组和风电机组间集电线路的等值高频阻抗模型，可得考虑风电机组间集电线路的链路 1 等值高频阻抗为

$$\begin{cases} Y' = [(1/Z_{\text{wfeq}} + Y_{\text{eq1}}/2)^{-1} + Z_{\text{c1}}]^{-1} + Y_{\text{eq1}}/2 \\ Z_{\text{lianeq1}} = \{[(Y' + Y_{\text{c1}}/2)^{-1} + Z_{\text{c1}}]^{-1} + Y_{\text{c1}}/2\}^{-1} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $Z_{\text{c1}} = R_{\text{c1}} + sL_{\text{c1}}$ ， $R_{\text{c1}}$  与  $L_{\text{c1}}$  为链路 1 电缆线路的电阻与电感， $Y_{\text{c1}} = sC_{\text{c1}}$ ， $C_{\text{c1}}$  为链路 1 电缆线路的对地电容； $Z_{\text{eq1}} = R_{\text{eq1}} + sL_{\text{eq1}}$ ， $R_{\text{eq1}}$  与  $L_{\text{eq1}}$  为链路 1 等值

架空线(风电机组间集电线路)的电阻与电感， $Y_{\text{eq1}} = sC_{\text{eq1}}$ ， $C_{\text{eq1}}$  为链路 1 等值架空线的对地电容。

目前大部分学者在对风电场等值高频阻抗建模的过程中忽略了风电机组间的集电线路，为了研究这种简化对高频振荡特性的影响，下文对比了考虑与忽略风电机组间集电线路的等值风电场高频阻抗的特性，忽略风电机组间集电线路的链路 1 等值高频阻抗为

$$Z'_{\text{lianeq1}} = \{[(1/Z_{\text{wfeq}} + Y_{\text{c1}}/2)^{-1} + Z_{\text{c1}}]^{-1} + Y_{\text{c1}}/2\}^{-1} \quad (19)$$

根据式(19)可得链路 2~4 的高频阻抗模型，在此不再赘述。通过串并联关系，最终可得到整个风电场的等值高频阻抗模型。

## 4 双馈风电场的等值高频阻抗模型的适用性分析与评价

在链路等值建模中，聚合风电机组的前提是假设风电机组的参数相同，然而工程中风电机组参数可能存在一定的差异性。相关研究表明，风电机组中控制延时、电流内环比例系数、网侧滤波器参数是影响高频特性的关键因素。因此，本节在同一链路不同风电机组之间多影响因素存在差异时，采用评价指标对等值与详细风电场高频阻抗模型的一致性进行评价，并研究考虑与忽略风电机组间集电线路对等值高频阻抗模型适用性的影响。

### 4.1 等值阻抗模型的一致性评价指标

为了量化等值风电场相对于详细风电场高频阻抗模型的一致性，本节通过式(20)计算等值阻抗模型的振荡频率相对于详细阻抗模型的相对误差，根据式(21)计算等值阻抗模型的相位相对于详细阻抗模型在 1000~3000Hz 频段的均方根误差(root mean square error, RMSE)。

$$\delta = \left| \hat{f}_c - f_c \right| / \hat{f}_c \quad (20)$$

式中： $f_c$  表示等值风电场的振荡频率； $\hat{f}_c$  表示详细风电场的振荡频率。

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{f_2 - f_1} \sum_{i=f_1}^{f_2} (\hat{p}_i - p_i)^2} \quad (21)$$

式中： $f_1 = 1000\text{Hz}$ ， $f_2 = 3000\text{Hz}$ ； $p_i$  表示等值风电场高频阻抗模型在  $i\text{Hz}$  处的相位； $\hat{p}_i$  表示详细风电场高频阻抗模型在  $i\text{Hz}$  处的相位。

### 4.2 风电机组间集电线路的影响

为了研究考虑与忽略风电机组间集电线路对

等值风电场高频阻抗模型的影响，基于上述建模方法与附录 A 所示的各设备参数，建立风电机组参数一致时的详细风电场、考虑风电机组间集电线路的等值风电场、忽略风电机组间集电线路的等值风电场的高频理论阻抗模型，如图 6 所示。

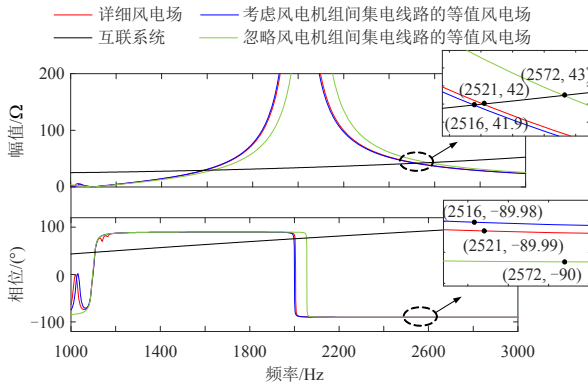


图 6 风电机组参数一致时的风电场高频理论阻抗对比  
Fig. 6 Comparison of high frequency theoretical impedance of wind farm when DFIG parameters are same

由图 6 可见，详细风电场阻抗与考虑风电机组间集电线路的等值风电场阻抗基本一致，而与忽略风电机组间集电线路的等值风电场阻抗则存在一定误差。三者与互联系统阻抗幅值分别相交于 2521Hz、2516Hz 与 2572Hz，相位差分别为 180.3°、180.1°与 181.7°，根据阻抗分析法<sup>[27,30]</sup>可知，均存在高频振荡风险。与详细风电场相比，考虑风电机组间集电线路的等值风电场基于振荡频率的相对误差仅为 0.2%，相位差误差仅为 0.2°，相位的均方根误差为 8.596；而忽略风电机组间集电线路的等值风电场基于振荡频率的相对误差为 2.02%，相位差误差为 1.4°，相位的均方根误差为 28.918。可见，忽略风电机组间集电线路会带来较大振荡频率与相位偏差，可能会影响高频稳定性判别，说明风电机组间集电线路对等值风电场高频阻抗抗模型适用性的影响较大。下面对同一链路不同风电机组的参数存在偏差时等值高频阻抗模型的适用性分析中均考虑了风电机组间的集电线路。

### 4.3 控制延时存在偏差的影响

在实际工程中，风电机组的控制延时存在偏差<sup>[31]</sup>。在本案例中，额定控制延时为 200μs，风电机组控制延时由服从正态分布的随机数生成，考虑 ±10% 以内的控制延时偏差，图 7 给出了链路 1 中 15 台风电机组的控制延时。

图 8 展示了风电机组控制延时存在偏差时的详细风电场与考虑风电机组间集电线路的等值风电场的高频理论阻抗对比。根据图 8 可以看出，详细

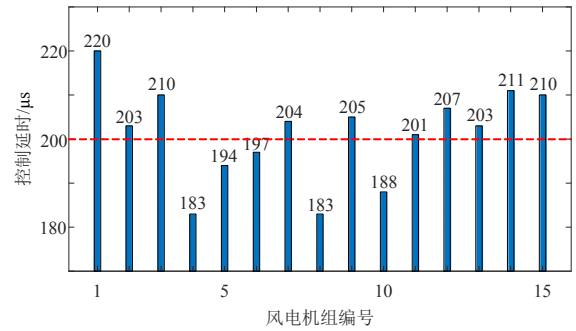


图 7 风电机组控制延时参数

Fig. 7 Parameters of control delay of wind turbines

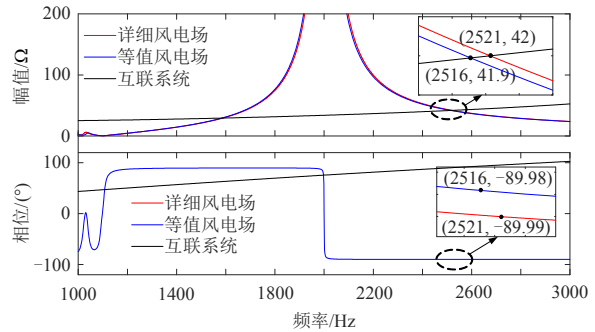


图 8 控制延时存在偏差时的风电场高频理论阻抗对比  
Fig. 8 Comparison of high frequency theoretical impedance of wind farm with different control delay

风电场阻抗在 2521Hz 处与互联系统阻抗幅值相等，相位差为 180.3°；而等值风电场阻抗在 2516Hz 处与互联系统阻抗幅值相等，相位差为 180.1°，存在对应频率的振荡风险。与详细风电场相比，等值风电场基于振荡频率的相对误差仅为 0.2%，相位差误差仅为 0.2°，相位的均方根误差为 8.602。可见，风电机组控制延时存在偏差时，等值与详细风电场高频阻抗模型依然具有较好的一致性。

### 4.4 电流内环比例系数不一致的影响

为研究风电机组群的电流内环比例系数存在差异的情况，在本案例中，设置 3 组较大差异的取值，并分配给链路 1 的 15 台风电机组，如表 1 所示。

表 1 风电机组电流内环比例系数参数

Table 1 Parameters of proportional coefficient of current inner loop of wind turbines

电流内环比例系数	风电机组编号
$k_{gp}=0.1, k_{ip}=0.1$	1~2、9~10
$k_{gp}=1, k_{ip}=1$	3~5、13~15
$k_{gp}=5, k_{ip}=5$	6~8、11~12

图 9 展示了风电机组电流内环比例系数不一致时的详细风电场与考虑风电机组间集电线路的等值风电场的高频理论阻抗对比。由图可见，详细风电场阻抗和互联系统阻抗幅值在 2521Hz 处相交，相位差为 180.3°；而等值风电场阻抗和互联系统阻

抗幅值在 2516Hz 处相交，相位差为 180.1°，存在高频振荡风险。与详细风电场相比，等值风电场基于振荡频率的相对误差仅为 0.2%，相位误差仅为 0.2°，相位的均方根误差为 8.019。可见，风电机组电流内环比例系数不一致时，等值与详细风电场高频阻抗模型一致性较好。

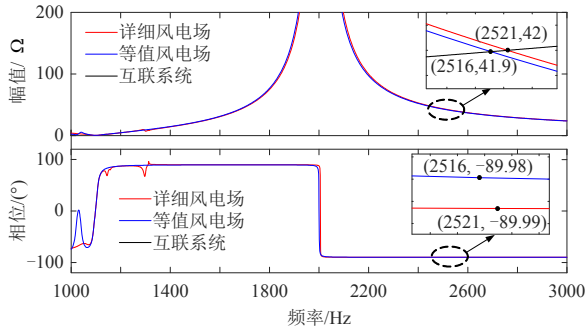


图 9 电流内环比例系数不一致时的风电场高频理论阻抗对比

Fig. 9 Comparison of high frequency theoretical impedance of wind farm with different proportional coefficient of current inner loop

#### 4.5 网侧 LC 滤波器参数存在偏差的影响

电气元件在制造时会存在一定的偏差，一般用于滤波电路中的电感精度要求较高，允许偏差为 ±0.2%~±0.5%，滤波电容的允许偏差为 -5%~+10%。在本案例中，额定滤波电感为 0.4mH，额定滤波电容为 501.3μF，风电机组的滤波器参数由服从正态分布的随机数生成，图 10 所示为链路 1 中 15 台风电机组的 LC 滤波器参数。

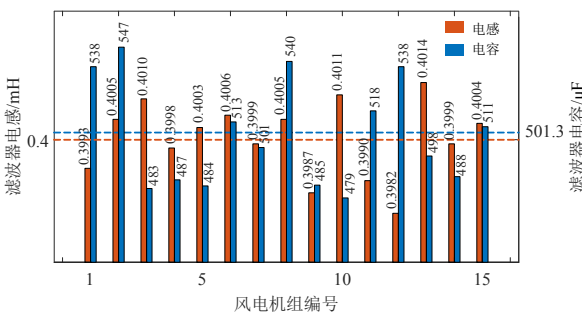


图 10 LC 滤波器电感和电容参数

Fig. 10 Parameters of inductance and capacitance of LC filter

图 11 展示了风电机组网侧 LC 滤波器参数存在偏差时的详细风电场与考虑风电机组间集电线路的等值风电场的高频理论阻抗对比。根据图 11 可以看出，详细风电场阻抗和互联系统阻抗幅频曲线在 2520Hz 处存在交点，且相位差达到了 180.3°；而等值风电场阻抗和互联系统阻抗幅频曲线在 2516Hz 处存在交点，且相位差达到了 180.1°，存在

高频振荡风险。与详细风电场相比，等值风电场基于振荡频率的相对误差仅为 0.16%，相位误差仅为 0.2°，相位的均方根误差为 9.537。可见，风电机组网侧 LC 滤波器参数存在偏差时，等值与详细风电场高频阻抗模型较为相似。

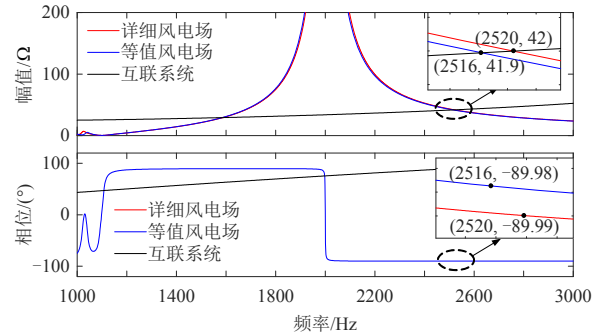


图 11 LC 滤波器参数存在偏差时的风电场高频理论阻抗对比

Fig. 11 Comparison of high frequency theoretical impedance of wind farm with different LC filter parameters

#### 4.6 多参数存在偏差的影响

考虑风电机组控制延时、电流内环比例系数、网侧滤波器参数均存在偏差的情况，建立了详细风电场与考虑风电机组间集电线路的等值风电场的高频理论阻抗模型，参数见图 7、10 与表 1，阻抗对比如图 12 所示。可以看出，详细风电场阻抗和互联系统阻抗幅频曲线在 2521Hz 处相交，且相位差达到了 180.3°；而等值风电场阻抗和互联系统阻抗幅频曲线在 2516Hz 处相交，且相位差达到了 180.1°，等值与详细风电场均存在高频振荡风险。

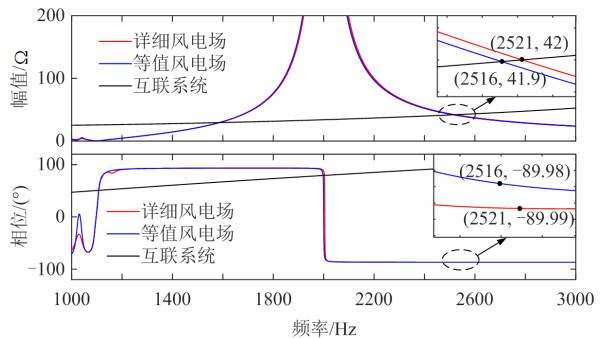


图 12 参数存在差异时的风电场理论阻抗对比

Fig. 12 Comparison of theoretical impedance of wind farm with different parameters

将以上对风电场等值高频阻抗模型的一致性评价汇总，结果如表 2 所示。由表可见，忽略风电机组间集电线路的等值风电场与详细风电场阻抗模型有较大差距，而考虑风电机组间集电线路的等值风电场与详细风电场阻抗模型具有较为优异的一致性，说明了在高频振荡研究中，风电机组间集

电线路对风电场等值高频阻抗模型的适用性有较大影响；在多种参数存在差异时，考虑风电机组间集电线路的等值风电场阻抗模型与风电机组参数一致时基本相同，说明了在考虑风电机组间集电线路之后，同一链路不同风电机组的控制延时、电流内环比例系数、网侧滤波器参数对风电场等值高频阻抗模型的适用性影响较小。5节将进一步通过仿真验证理论分析的正确性。

表2 等值风电场相较于详细风电场模型的一致性评价

Table 2 Consistency evaluation of equivalent wind farm model compared to detailed wind farm model

案例设置	忽略风电机组间集电线路		考虑风电机组间集电线路	
	振荡频率	高频段相	振荡频率	高频段相位
	相对误差/%	位 RMSE	相对误差/%	RMSE
风电机组参数一致	2.02	28.918	0.2	8.596
控制延时存在偏差	2.02	28.931	0.2	8.602
电流内环比例系数不一致	2.02	28.347	0.2	8.019
LC滤波器参数存在偏差	2.06	28.190	0.16	9.537
多参数存在偏差	2.03	28.145	0.2	10.069

### 5 等值阻抗模型适用性分析的仿真验证

基于附录 A 所示的各设备参数，在 PSCAD/EMTDC 中分别搭建了详细风电场、考虑风电机组间集电线路的等值风电场、忽略风电机组间集电线路的等值风电场的电磁暂态仿真模型。3 个风电场仿真模型中，链路 1 分别为详细模型、考虑风电机组间集电线路的等值模型和忽略风电机组间集电线路的等值模型，而链路 2~4 均为等值模型。以上等值模型均根据 3 节中的等值方法计算得到等值参数。

#### 5.1 风电机组间集电线路对等值阻抗模型适用性影响的验证

图 13 所示为风电机组参数一致时的风电场公共连接点(point of common coupling, PCC)处电压波形及 2.06s 时 A 相电压谐波分析结果。由图可知，在 2s 时投入 SVG 后，详细风电场、考虑风电机组间集电线路的等值风电场与忽略风电机组间集电线路的等值风电场分别发生了 2518Hz、2513Hz 与 2569Hz 的高频振荡，与图 6 给出的风电机组参数一致时的风电场理论阻抗对比结果基本一致。根据仿真结果可知，忽略风电机组间集电线路的等值模型与详细模型仿真结果有较大误差，而考虑风电机组

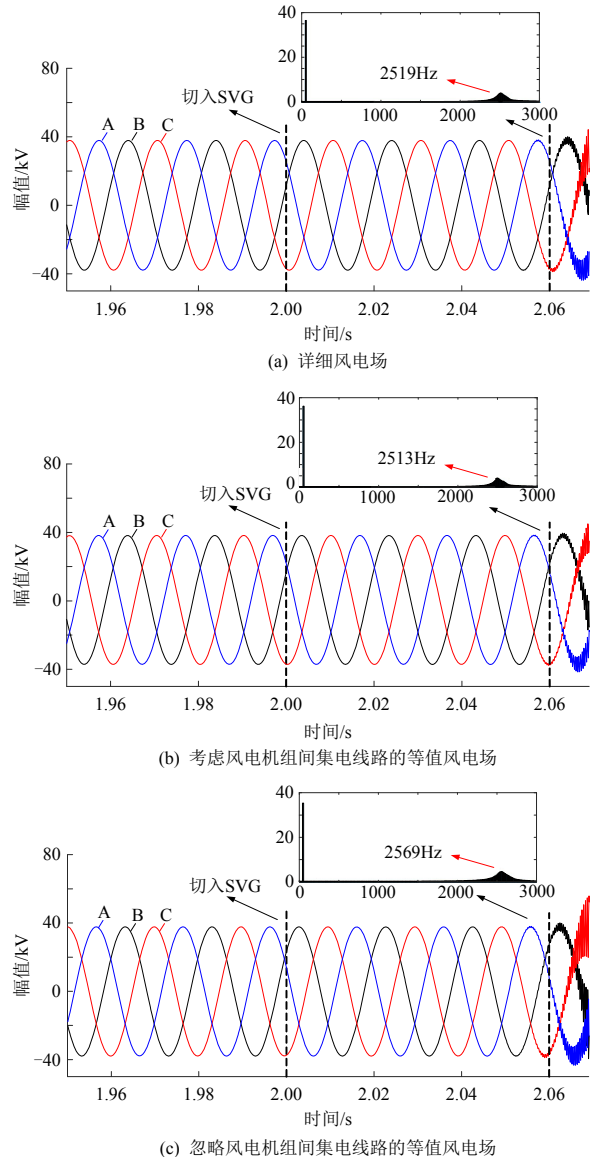


图 13 风电机组参数一致时的

风电场 PCC 点电压波形及其 A 相电压谐波分析

Fig. 13 PCC point voltage waveform and phase A voltage harmonic analysis of the wind farm with same parameters

#### 5.2 风电机组参数存在差异对等值阻抗模型适用性影响的验证

本案例仿真模型考虑了风电机组控制延时、电流内环比例系数、网侧滤波器参数均存在差异的情况，在 2s 时投入 SVG，图 14 为详细风电场与等值风电场 PCC 点处电压波形及 2.06s 时 A 相电压谐波分析结果。由图 14 可知，详细风电场发生了 2519Hz 高频振荡，等值风电场发生了 2513Hz 高频振荡，与图 12 给出的风电机组参数存在差异时的风电场理论阻抗对比结果基本一致，且等值与详细风电场仿真结果基本一致，验证了理论分析的正确性。



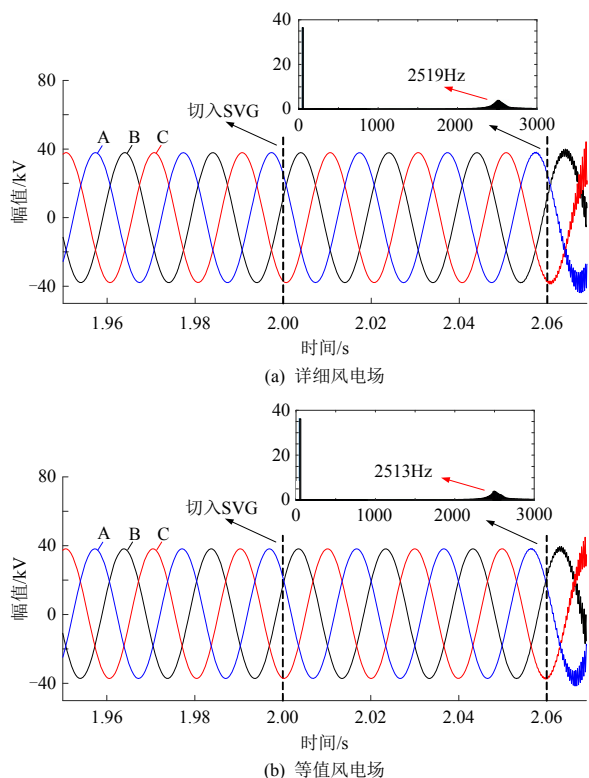


图 14 参数存在差异时的风电场 PCC 点电压波形及其 A 相电压谐波分析

Fig. 14 PCC point voltage waveform and phase A voltage harmonic analysis of wind farm with different parameters

## 6 结论

本文以国内某双馈风电场为例，构建了详细风电场与等值风电场的高频阻抗模型，在同一链路不同风电机组之间关键参数存在差异等场景下，采用振荡频率相对误差、高频段相位均方根误差两个指标综合评价等值与详细风电场高频阻抗模型的一致性，并研究考虑与忽略风电机组间集电线路对等值高频阻抗模型适用性的影响，得到以下结论：

1) 风电机组间集电线路对风电场等值高频阻抗模型的适用性有较大影响，因此在高频振荡研究中，风电场等值模型有必要考虑风电机组间集电线路的影响；

2) 在考虑风电机组间集电线路之后，同一链路不同风电机组的控制延时、电流内环比例系数、网侧滤波器参数存在一定差异时，等值风电场与详细风电场高频阻抗模型均具有较好的一致性，因此上述差异对风电场等值高频阻抗模型的适用性影响较小。

本文所得结论可以为研究规模化风电场高频振荡现象提供等值模型的适用性参考依据。然而，风电场等值方法众多，不同等值方法对阻抗模型适

用性的影响还有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2022-02-28). [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202202/t20220227\\_1827960.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202202/t20220227_1827960.html). National Bureau of Statistics. 2021 statistical bulletin of national economic and social development [EB/OL]. (2022-02-28). [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202202/t20220227\\_1827960.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202202/t20220227_1827960.html)(in Chinese).
- [2] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191. ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191(in Chinese).
- [3] 王一珺, 杜文娟, 王海风. 大规模风电汇集系统小干扰稳定性研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1934-1946. WANG Yijun, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Research on small signal stability analysis of large-scale wind power collection system-an overview[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1934-1946(in Chinese).
- [4] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4731. MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4731(in Chinese).
- [5] ZHU Lin, HU Xinge, LI Shuyong. High-frequency resonance of DFIG-based wind generation under weak power network[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Power System Technology. Guangzhou, China: IEEE, 2018.
- [6] 陶顺, 闫亚楠, 刘云博. 基于导纳模型的并网直驱风电场高频谐振分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7832-7842. TAO Shun, YAN Ya'nan, LIU Yunbo. High frequency resonance analysis of power system with a D-PMSG-based wind farm based on admittance model [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7832-7842(in Chinese).
- [7] CHI Yongning, TANG Bingjie, HU Jiabing, et al. Overview of mechanism and mitigation measures on multi-frequency oscillation caused by large-scale integration of wind power[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(4): 433-443.

- [8] SONG Yipeng, EBRAHIMZADEH E, BLAABJERG F. Analysis of high-frequency resonance in DFIG-based offshore wind farm via long transmission cable[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(3): 1036-1046.
- [9] EBRAHIMZADEH E, BLAABJERG F, WANG Xiongfei, et al. Harmonic stability and resonance analysis in large PMSG-based wind power plants[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 12-23.
- [10] ZHANG Shao, JIANG Shuai, LU Xi, et al. Resonance issues and damping techniques for grid-connected inverters with long transmission cable[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1): 110-120.
- [11] SONG Yipeng, WANG Xiongfei, BLAABJERG F. Impedance-based high-frequency resonance analysis of DFIG system in weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3536-3548.
- [12] PANG Bo, NIAN Heng, XU Yunyang. Mechanism analysis and damping method for high frequency resonance between VSC-HVDC and the wind farm [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(2): 984-994.
- [13] 年珩, 童豪, 胡彬, 等. 无锁相环直接功率控制下双馈风电与 VSC-HVDC 互联系统高频振荡抑制技术[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2492-2499.
- NIAN Heng, TONG Hao, HU Bin, et al. High frequency resonance suppression of doubly fed induction generator connected to VSC-HVDC system based on direct power control without phase-locked loop[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2492-2499(in Chinese).
- [14] 刘其辉, 董楚然, 于一鸣. 双馈风电并网系统高频谐振机理及抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 163-172.
- LIU Qihui, DONG Churan, YU Yiming. High frequency resonance mechanism and suppression strategy of doubly-fed wind power grid-connected system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 163-172(in Chinese).
- [15] SONG Yipeng, BLAABJERG F, WANG Xiongfei. Analysis and active damping of multiple high frequency resonances in DFIG system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 369-381.
- [16] 秦世耀, 李少林, 王瑞明, 等. 大容量永磁同步风电机组系统谐振与抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 11-16.
- QIN Shiyao, LI Shaolin, WANG Ruiming, et al. Resonance and suppression strategy of large-capacity permanent magnet synchronous generator wind turbine system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 11-16(in Chinese).
- [17] 李亦伦. 一起风电场高频振荡事故的原因和解决方法分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 135-142.
- LI Yilun. Analysis of causes and solutions of a high-frequency oscillation accident in a wind farm [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 135-142(in Chinese).
- [18] 张剑, 何怡刚. 基于轨迹灵敏度分析的永磁直驱风电场等值模型参数辨识[J]. 电工技术学报, 2020, 35(15): 3303-3313.
- ZHANG Jian, HE Yigang. Parameters identification of equivalent model of permanent magnet synchronous generator wind farm based on analysis of trajectory sensitivity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(15): 3303-3313(in Chinese).
- [19] 潘学萍, 戚相威, 梁伟, 等. 综合模型聚合和参数辨识的风电场多机等值及参数整体辨识[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 124-132.
- PAN Xueping, QI Xiangwei, LIANG Wei, et al. Multi-machine equivalence and global identification of wind farms by combining model aggregation and parameter estimation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 124-132(in Chinese).
- [20] 王一珺, 王海风. 直流电压动态时间尺度下大规模直驱风电场振荡稳定性及参数稳定域分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 92-107.
- WANG Yijun, Wang Haifeng. Analysis of oscillation stability and stability region of parameters in large-scale direct-drive wind farms under DC voltage dynamic time scale[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 92-107(in Chinese).
- [21] 李龙源, 付瑞清, 吕晓琴, 等. 接入弱电网的同型机直驱风电场单机等值建模[J]. 电工技术学报, 2023, 38(3): 712-725.
- LI Longyuan, FU Ruiqing, LÜ Xiaoqin, et al. Single machine equivalent modeling of weak grid connected wind farm with same type PMSGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 712-725(in Chinese).
- [22] SONG Yipeng, BLAABJERG F. Overview of DFIG-based wind power system resonances under weak networks[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4370-4394.
- [23] ZHANG Chen, CAI Xu, MOLINAS M, et al. On the impedance modeling and equivalence of AC/DC-side stability analysis of a grid-tied type-IV wind turbine system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(2): 1000-1009.
- [24] 年珩, 周骐, 吴超, 等. 双馈风电机组并网运行下谐波

电流建模与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 5037-5048.

NIAN Heng, ZHOU Qi, WU Chao, et al. The modeling and characteristic analysis of harmonic current of DFIG based wind turbine in grid-connected mode [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 5037-5048(in Chinese).

[25] 崔翔. 无损耗传输线物理模拟的集总电路级联数目确定方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2561-2570. CUI Xiang. Chained number of lumped-circuits for physical analogy of the lossless transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2561-2570(in Chinese).

[26] ZOU Changyue, RAO Hong, XU Shukai, et al. Analysis of resonance between a VSC-HVDC converter and the AC grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10157-10168.

[27] 杜东冶, 郭春义, 贾秀芳, 等. 基于附加带阻滤波器的模块化多电平换流器高频谐振抑制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7): 1516-1525. DU Dongye, GUO Chunyi, JIA Xiufang, et al. Suppression strategy for high frequency resonance of modular multilevel converter based on additional band-stop filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7): 1516-1525(in Chinese).

[28] 米增强, 苏勋文, 杨奇逊, 等. 风电场动态等值模型的多机表征方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 162-169. MI Zengqiang, SU Xunwen, YANG Qixun, et al. Multi-machine representation method for dynamic equivalent model of wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 162-169(in Chinese).

[29] 夏玥, 李征, 蔡旭, 等. 基于直驱式永磁同步发电机组的风电场动态建模[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1439-1445. XIA Yue, LI Zheng, CAI Xu, et al. Dynamic modeling of wind farm composed of direct-driven permanent magnet synchronous generators[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1439-1445(in Chinese).

[30] SUN Jian. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.

[31] 尹聪琦, 谢小荣, 刘辉, 等. 柔性直流输电系统振荡现象分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1117-1123. YIN Congqi, XIE Xiaorong, LIU Hui, et al. Analysis and control of the oscillation phenomenon in VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1117-1123(in Chinese).

附录 A

表 A1 风电场内各设备参数

Table A1 Parameters of equipment in the wind farm

设备	参数	数值
双馈 风电机组	额定容量 $S_N$ /MVA	2
	额定风速/(m/s)	11.6
	额定电压 $V_N$ /kV	0.69
	定子电阻 $R_s$ /pu	0.02512
	转子电阻 $R_r$ /pu	0.02836
	定子漏感 $L_{\sigma s}$ /pu	0.5041
	转子漏感 $L_{\sigma r}$ /pu	0.3566
	互感 $L_m$ /pu	3.2993
	变流器电流内环比例系数 $k_{gp}, k_{rp}$	1
	变流器电流内环积分系数 $k_{gi}, k_{ri}$	5
	控制延时 $T_{rs}, T_{gs}$ /μs	200
	滤波器电感 $L_f$ /mH	0.4
	滤波器电容 $C_f$ /μF	501.3
	机端变压器容量/MVA	2.35
	机端变压器变比/kV	0.69/38.5
	机端变压器漏抗/pu	0.0681
SVG	额定容量/MVA	±60
	额定电压/kV	38.5
	滤波电感 $L_s$ /H	0.0065
	延时 $T_{ds}$ /μs	190
	电流内环比例系数 $k_p$	0.3
	电流内环积分系数 $k_i$	0.03
交流 系统	额定电压/kV	220
	短路比 SCR	10
	主变压器容量/MVA	120
	主变压器变比/kV	220/38.5
	主变压器漏抗/pu	0.2736

表 A2 链路 1 风电机组间架空线路参数

Table A2 Parameters of overhead lines between wind turbines in link 1

架空线	长度/m	架空线	长度/m
$l_1$	297	$l_2$	367
$l_3$	877	$l_4$	380
$l_5$	617	$l_6$	1009
$l_7$	538	$l_8$	541
$l_9$	223	$l_{10}$	352
$l_{11}$	161	$l_{12}$	407
$l_{13}$	229	$l_{14}$	506
$l_{15}$	478	$l_{16}$	223
$l_{17}$	404	$l_{18}$	627
$l_{19}$	335	—	—

说明:  $l_1 \sim l_{12}$ 、 $l_{15} \sim l_{16}$ 、 $l_{19}$  采用 JL/G1A-185/30 型号架空线;  $l_{13} \sim l_{14}$ 、 $l_{17}$  采用 JL/G1A-240/30 型号架空线;  $l_{18}$  采用 JL/G1A-300/30 型号架空线。

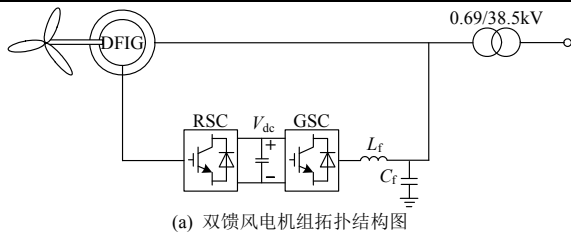
表 A3 链路出口处电缆线路参数

电缆	长度/m
1	4295
2	3757
3	4436
4	4077

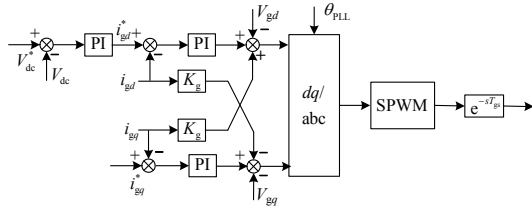
说明: 4 条电缆均采用 ZRC-YJY63-26/35kV 1×400mm<sup>2</sup> 型号电缆。

表 A4 链路 1 等值架空线参数

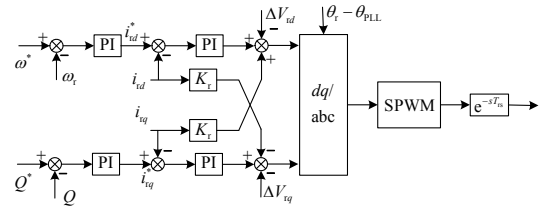
参数	数值
等值电阻 $R_{eq1}/\Omega$	0.2375
等值电感 $L_{eq1}/mH$	1.9932
等值电容 $C_{eq1}/\mu F$	0.07856



(a) 双馈风电机组拓扑结构图



(b) GSC 控制框图



(c) RSC 控制框图

图 A1 双馈风电机组拓扑结构及控制框图

Fig. A1 Topological structure and control block diagram of DFIG



甘繁欣

在线出版日期: 2022-11-02。

收稿日期: 2022-04-26。

作者简介:

甘繁欣(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为直流输电等, ganfanxin\_ncepu@163.com;

\*通信作者: 郭春义(1984), 男, 博士, 教授, 研究方向为直流输电、FACTS 等, chunyi guo@outlook.com;

程浩(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流输电等, 936222129@qq.com;

谭尚晨(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流输电等, 2423329952@qq.com;

杜东冶(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为直流输电等, dudongye1994@163.com。

(责任编辑 李泽荣)