

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201545

一起风电场高频振荡事故的原因和解决方法分析

李亦伦

(中广核新能源控股有限公司, 北京 100000)

摘要: 基于广西木格风电场高频振荡时的电气参数以及风机网侧变频器的控制原理, 建立了风机网侧变频器的传递函数模型。通过网侧变频器传递函数模型和其诺顿等效电路的对比分析, 求出了网侧变频器等效阻抗的频域表达式。通过伯德图对网侧变频器等效阻抗和电网阻抗的幅频特性、相频特性进行分析, 得出了高频振荡事故的原因是在特定频率下网侧变频器等效阻抗和电网阻抗形成了谐振。然后提出了通过修改前馈电压系数来改变网侧变频器等效阻抗的幅频、相频特性, 从而解决高频振荡问题的方案。对修改前馈电压系数后的风机并网系统传递函数模型进行分析, 求出了其开环传递函数。用伯德图进行分析证明了修改后系统的稳定裕度明显增加。木格风电场采取此措施后在各种工况下验证, 均能够正常运行, 证明了所提解决方案的有效性。

关键词: 直驱风机; 等效阻抗; 传递函数; 伯德图

Analysis of causes and solutions of a high-frequency oscillation accident in a wind farm

LI Yilun

(CGNPC New Energy Investment Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: Based on the high frequency oscillation characteristics of Guangxi Muge wind power plant and the control principle of the grid-side frequency converter of a wind turbine, a transfer function model of the wind turbine grid-side frequency converter is established. By comparative analysis of the transfer function model of the grid-side frequency converter and its Norton equivalent circuit, the frequency domain expression of the grid-side equivalent inverter impedance is obtained. Bode diagram analysis of amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the grid-side frequency converter equivalent impedance show that the incidence of high frequency oscillation is caused by resonance from the grid and converter impedances at a certain frequency. To overcome the problem of high-frequency oscillation, the method of modifying the feedforward voltage coefficient then changing the amplitude and frequency of the equivalent impedance and converter phase-frequency characteristics is proposed. The open-loop transfer function can be obtained by modifying the feedforward voltage coefficient of the grid connected system transfer function. Bode diagram analysis shows that the margin stability of the system is increased significantly after modification. It has been verified that a Muge wind power plant can operate normally under various working conditions after taking this measure. This demonstrates that the proposed solution is effective.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61803219).

Key words: direct drive fan; equivalent impedance; transfer function; Bode diagram

0 引言

近年来新能源接入电力系统的规模快速扩大^[1-4], 由此引起的一些有别于传统电力系统的问题也逐渐显现^[5-9]。其中风电并网运行引起的频率振荡问题尤为突出, 由于其影响的范围大、对系统的破

坏也较为严重而受到越来越多的关注^[10-14]。近年来陆续有一些文献在此类问题的研究上取得了成果^[15-17], 其中一些从风机并网系统的频率响应出发对系统的稳定性进行了研究, 但是没有针对不同类型的频率振荡问题提出具体的解决措施^[18-19]; 另外一些文献提出了解决方案, 但是其方案往往要求对设备进行改造^[20], 不便于在运行风电场中实施。而本文基于一起实际发生的风电场频率振荡事故, 对频率

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61803219)

振荡发生的机理进行了分析并提出了便于现场实施的解决方法。对于此类问题的现场解决有很强的指导意义。

2020年3月30日广西木格风电场并网投运过程中发生了频率振荡事故，在一定范围的区域电网内造成了频率的波动。经过几次试送发现只要并网的风机达到一定台数，就有可能引起频率振荡。为了解决此问题，本文在网侧变频器控制原理的基础上分析并建立了变频器等效阻抗模型，通过分析电网侧阻抗的匹配问题，提出并验证了木格风电场高频振荡事故发生的机理，然后通过对变频器并网系统的频率响应特性分析提出了解决方法。此方法在木格风电场实施并取得了良好效果。

1 故障现象简述及初步分析

广西木格风电场装机 80 MW，共有 25 台 3 200 kW 的半直驱风机，其升压站主接线如图 1 所示。该风场 2019 年 12 月首次并网，3 月 30 日风机投运至 19 台时，在出现了紧急频率电压装置告警、主变发出异常响声、35 kV 和 110 kV 侧频率波动等一系列异常现象，经初步判断为频率振荡事故。然后经过几次现场试验发现，在当时的出力条件下每次投入的风机达到 19 台时就会发生频率振荡，与投入哪台风机无关，只与投入的风机台数有关。

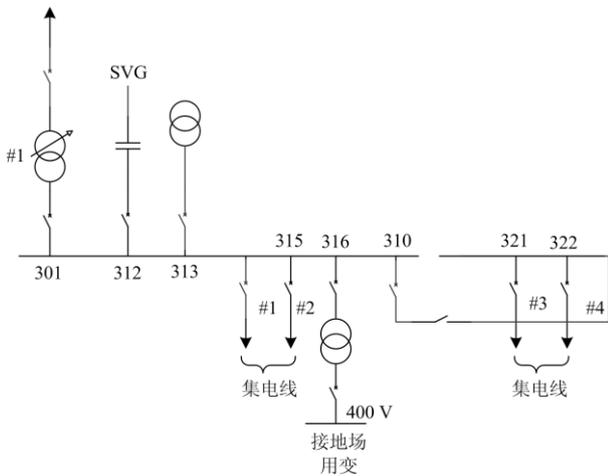


图 1 木格风电场一次系统图

Fig. 1 Primary system diagram of Muge wind farm

对故障时的电压波形进行 FFT 分析发现频率振荡过程中电压波形中除了工频基波之外还有 126 Hz 的谐波分量(如图 2 所示)，所以可以判断振荡频率为 126 Hz。根据频率振荡的分类可以判断这是一次高频振荡。

风电并网运行中引起频率振荡的因素很多，如

感应电机效应、机电扭振、暂态扭矩放大等。木格风电场风机为半直驱风机采用全功率变频器，机侧变频器和网侧变频器之间有直流隔离，所以可以排除与发电机有关的因素，基本可以将振荡机理锁定为在弱电网条件下网侧变频器等效阻抗与电网侧阻抗参数匹配问题造成的频率振荡。

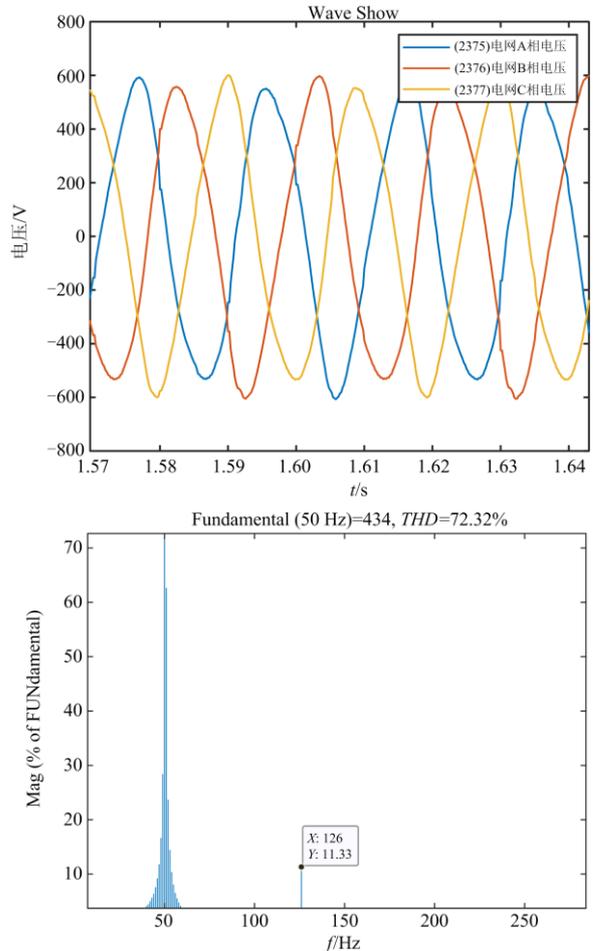


图 2 故障电压时域波形和 FFT 分析

Fig. 2 Time domain waveform and FFT analysis of fault voltage

2 振荡机理的分析

2.1 风机网侧变频器的控制原理

我国的有效风电、光伏资源主要分布在远离负荷中心的偏远地区，需要通过远距离输电接入主干网^[21-22]。随着新能源接入电网规模的扩大，对于新能源接入点来说，电网越来越多地呈现弱电网的特性，主要体现为以下两个特点：1) 电网的阻抗不可忽略^[23-24]；2) 存在严重的背景谐波。文献^[25]引入了短路比来表征电网的强弱，木格风电场 110 kV 的短路比 5.5，短路比低于 6 应按照弱电网的情况考虑^[26]。所以其电网的阻抗不可忽略，研究频率振荡

问题时可以将电网等效为带有内阻的电压源。

本格风电场风机网侧变频器的控制原理如图 3 所示, 图中 L 、 C 分别是变频器出口滤波器的电抗和电容, R 是电抗器的电阻, L_s 是网侧的等值电抗, H_i 和 H_v 分别是电流反馈系数和电压反馈系数, U_s 是电网电压。整个控制系统可以分为控制内环和控制外环两部分, 其中内环采用电流控制, 外环采用功率控制。外环从滤波器外侧采功率信号, 然后以网侧电压为基准解耦至 d 、 q 轴分别控制。 d 轴的控制目标是变频器直流侧储能电容的电压, q 轴的控制目标是 AVC 下发至风机的无功控制指令。经 PI 控制器调节后合成为电流 i^* , 作为内环控制的目标值。内环控制部分从电容器之前取电流采样与外环输入的给定电流值比较后经 PI 控制器调节输出变频器电压调整值, 与前馈电压值相加后, 得到变频器输出电压值, 再经 SVPWM 控制器调制后向网侧 IGBT 输出脉冲。通过图 3 不难看出, 外环控制部分 d 轴的控制目标是将直流侧储能电容的电压稳定在某一范围, 这就要求在一小段时间内机侧变频器输出至直流侧的电量和直流侧输出至网侧变频器的电量之间要达到平衡。也就是说 d 轴的实质控制目标是跟踪机侧变频器的出力, 保证发电机发出的功率全部送至电网。结合 q 轴的控制目标, 可以认为整个外环部分的控制目标是风机的视在功率, 而外环的输出值 i^* 是风机视在功率对应的电流, 也就是内环控制的目标值。

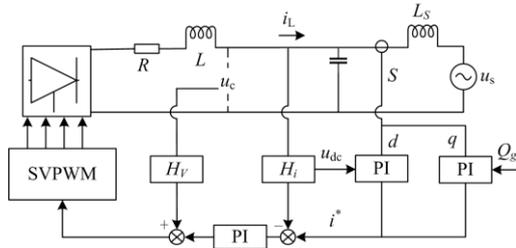


图 3 风机变流器并网控制原理图

Fig. 3 Grid connected control schematic diagram of wind turbine converter

2.2 网侧变频器的诺顿等效电路

由 2.1 节所述分析可知外环控制的作用是根据发电机和机侧变频器出力以及电网要求发出无功的变化向内环给出电流的控制目标值。因为与控制过程相比风机出力的变化过程缓慢, 所以不影响系统的暂态特性, 也就是说外环控制与风机稳定性关系不大, 在研究风机的频率振荡问题时只需考虑内环的响应特性即可。

根据 2.1 节所述内环控制原理及图 1 中内环部

分各变量之间关系, 可画出网侧变频器内环控制框图如图 4 所示。

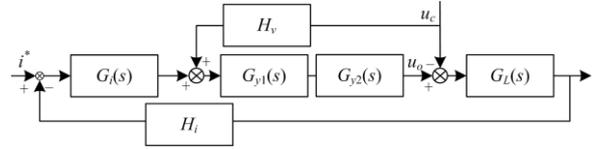


图 4 网侧变频器内环控制框图

Fig. 4 Inner loop control block diagram of grid side converter

图中 $G_i(s)$ 是 PI 控制器的传递函数; $G_{y1}(s)$ 是采样环节的传递函数, 考虑到采样环节 AD 转换一般有一个采样周期的延时^[27-28]; $G_{y2}(s)$ 是 SVPWM 控制器的传递函数, 因 SVPWM 控制器有零阶保持器的特性, 所以一般来说有半个开关周期的延时; $G_L(s)$ 是网侧变频器出口滤波器中电感的传递函数。在图 4 所示的输入输出下 $G_i(s)$ 、 $G_{y1}(s)$ 、 $G_{y2}(s)$ 、 $G_L(s)$ 的表达式分别为

$$G_i(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (1)$$

$$G_{y1}(s) = \frac{1}{T_s} e^{-sT_s} \quad (2)$$

$$G_{y2}(s) = T_s e^{-0.5sT_s} \quad (3)$$

$$G_L(s) = \frac{1}{R + Ls} \quad (4)$$

因本格风电场现场电流反馈系数 H_i 设置为 1, 而下文所述解决措施的分析也不涉及 H_i 的改动, 所以可在控制框图中将 H_i 忽略。将 $G_{y1}(s)$ 、 $G_{y2}(s)$ 合并得内环控制的总延时为

$$G_y(s) = G_{y1}G_{y2} = \frac{1}{T_s} e^{-sT_s} \times T_s e^{-0.5sT_s} = e^{-1.5sT_s} \quad (5)$$

网侧变频器的内环控制框图可简化为图 5 所示。

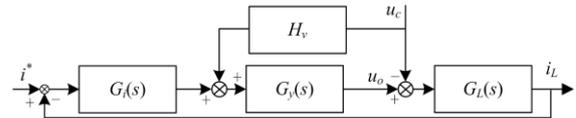


图 5 简化的内环控制框图

Fig. 5 Simplified inner loop control block diagram

根据图 5 以及反馈系统闭环传递函数公式, 可推导出 i_L 的表达式为

$$i_L = i^* \frac{G_y G_i G_L}{1 + G_y G_i G_L} - u_c \frac{G_L (1 - G_y H_v)}{1 + G_y G_i G_L} \quad (6)$$

需要注意的是, 因为本格风电场的变频器采用 LC 滤波电路, 所以其滤波电容上的电压就是变频器出口电压。根据 2.1 节所述可知网侧变频器内环

控制器的核心是根据出口电压调整输出电压,从而使输出电流跟踪目标电流,具有明显的电流源特性。再结合式(6),网侧变频器可以等效为理想电流源和内阻的组合,其诺顿等效电路如图6所示。

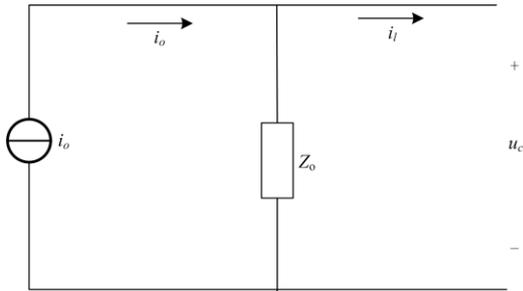


图6 网侧变频器的诺顿等效电路

Fig. 6 Norton equivalent circuit of grid side inverter

2.3 振荡机理的分析

图6中 i_L 由电流源输出的电流 i_o 和流过阻抗 Z_o 的电流两部分组成。其中 i_o 部分与 u_c 无关,流过 Z_o 的电流与 u_c 成正比。结合式(6)不难判断 i_o 和 Z_o 的表达式为

$$i_o = i \times \frac{G_y G_t G_l}{1 + G_y G_t G_l} \quad (7)$$

$$Z_o = \frac{1 + G_y G_t G_l}{G_t (1 - G_y H_v)} \quad (8)$$

将式(1)、式(4)、式(5)代入式(8),得

$$Z_o = \frac{1 + e^{-1.5sT_s} \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) R + Ls}{\frac{1}{R + Ls} (1 - e^{-1.5sT_s} H_v)} \quad (9)$$

将延迟环节用泰勒级数展开可得

$$e^{-1.5sT_s} = \frac{1}{1 + 1.5T_s s + \frac{(1.5T_s)^2 s^2}{2!} + \frac{(1.5T_s)^3 s^3}{3!} \dots} \quad (10)$$

因木格风电场风机变频器开关频率为 2 500 Hz,所以 T_s 很小,分母中级数可只保留前两项。而电压前馈系数 H_v 取 1,将两者代入式(9),并忽略电感电阻 R 后化简得

$$Z_o = \frac{1.5T_s L s^3 + L s^2 + k_p s + k_i}{1.5T_s s^2} \quad (11)$$

因为要通过幅频特性和相频特性计算来准确描述 Z_o 的频率响应,其中涉及到高次方程的求解。而高次方程根的表达式也过于复杂,用来判断 Z_o 特性随频率的变化非常困难。简便的方法是绘制 Z_o 的伯德图来判断 Z_o 的频率响应情况。根据木格风电场的

实际参数 T_s 取 1/2500 s, L 取 120 μ H, K_p 取 0.15, K_i 取 11.7,代入式(11)后绘制伯德图如图7所示。

图7中在振荡频率 126 Hz 处 Z_o 的相频特性为 -52.56° ;而且幅值很低,考虑到多台变频器并联其阻抗幅值更低,也就是说在此频段, Z_o 表现为很强的容抗特性。容性阻抗使系统阻尼减小,容易与网侧电抗形成二阶振荡电路,在风电场背景谐波或其它激励源作用下使电流电压发散发散振荡,从而造成较高含量的谐波。

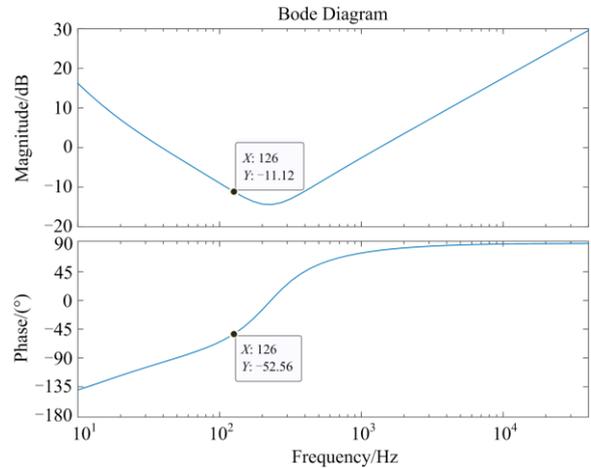


图7 网侧变频器等效阻抗伯德图

Fig. 7 Bode diagram of grid side frequency converter equivalent impedance

2.4 振荡机理的验证

通过上一小节的分析可知,造成木格风电场频率振荡的原因极有可能是变频器等效阻抗与电网侧阻抗的匹配问题。要进一步验证木格风电场高频振荡是否由此引起,可根据振荡时的运行条件计算风电场并网系统的谐振频率是否在 126 Hz 附近。对比变频器等效阻抗和电网阻抗的幅频、相频特性,如果在 126 Hz 处变频器等效阻抗与电网阻抗的幅频特性相近而相频特性相差在 180° 左右,就可以认为 126 Hz 在谐振点附近,则此次高频振荡事故是由于变频器等效阻抗与电网侧阻抗匹配问题引起。为了计算方便将所有运行的风机等效为一台虚拟的风机升压变组。其并网系统的等效电路图如图8所示。

图8中 N 为运行风机的台数, i_c 为单台风机流过滤波电容支路的电流, X_t 为单台升压箱变的阻抗, i_t 为单台风机流过升压箱变的电流, X_s 为含主变压器、送出线路的电网侧的等效阻抗。为了方便计算将出口滤波器的电容归算到变频器侧,将变压器阻抗归算到电网侧,并近似认为每个风机出力相等。根据图8可得流过单台升压箱变的电流 i_t 为

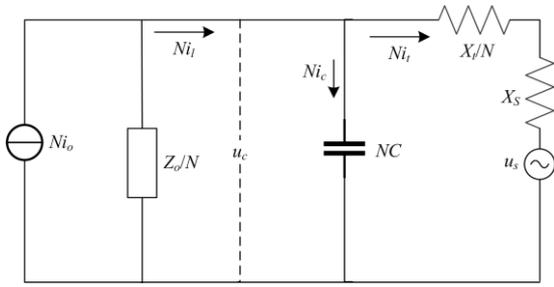


图 8 风机并网系统等效电路

Fig. 8 Equivalent circuit of wind turbine grid connected system

$$i_t = i_L - i_c = i \times \frac{G_y G_i G_l}{1 + G_y G_i G_l} - u_c \left[\frac{G_l (1 - G_y H_v)}{1 + G_y G_i G_l} + G_c \right] \quad (12)$$

则将电容器归算至变频器阻抗后，变频器的等效阻抗 Z'_o 为

$$Z'_o = \frac{G_l (1 - G_y H_v) + G_c + G_y G_i G_l G_c}{1 + G_y G_i G_l} \quad (13)$$

将 $G_e = Cs$ 以及式(1)、式(4)、式(5)代入式(13)化简得

$$Z'_o = \frac{1.5T_s Ls^3 + Ls^2 + K_p s + K_i}{1.5T_s L C s^4 + L C s^3 + (1.5T_s + Ck_p) s^2 - (Ck_i - 1) s} \quad (14)$$

当 N 台风机处于运行状态时可等效为一台内阻为 Z'_o/N 的虚拟风机。根据木格风电场发生振荡时的实际情况取 N 等于 19、电容值 C 取 2352 μF ，再将其他参数代入后绘制伯德图如图 9 所示。

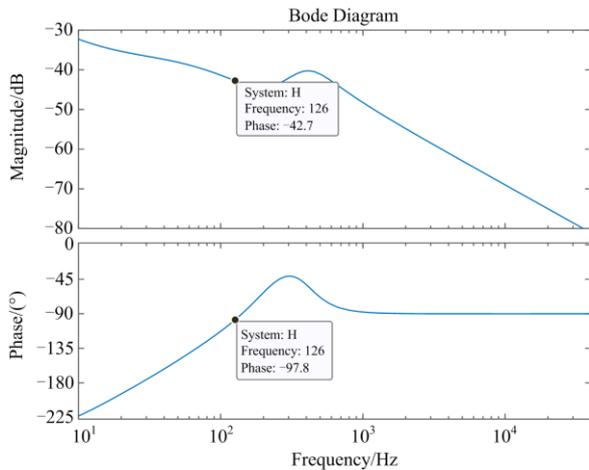


图 9 变频器等效阻抗频率响应

Fig. 9 Equivalent impedance frequency response of frequency converter

把木格风电场线路阻抗、主变阻抗、系统阻抗折算为有名值，并折算至 690 V 电压等级，与折算后的虚拟升压箱变阻抗合并后为 0.003 18 Ω 。将网侧阻抗全部按照纯感抗考虑，可计算得网侧等效电感值约为 10 μH 。所以网侧阻抗的频域表达式为

$$Z_{sN}(s) = \frac{Z_t}{N} + Z_s = 0.00001 s \quad (15)$$

根据式(15)绘制网侧阻抗伯德图如图 10 所示。

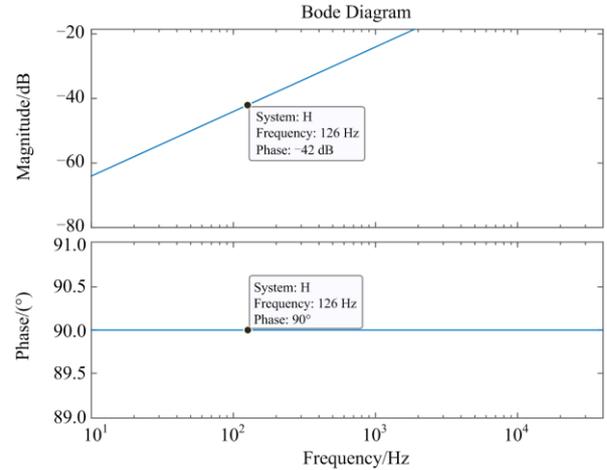


图 10 网侧等效阻抗频率响应

Fig. 10 Equivalent impedance frequency response at grid side

对比图 9 和图 10 不难发现在 126 Hz 处网侧阻抗和变频器侧阻抗的幅值大致相等，相角近似相差 180°。结合木格风电场发生振荡后多次试投都在投入第 19 台风机后发生振荡的情况，可以判定引起此次高频振荡事故是由于风机投入至 19 台时变频器等效阻抗与系统阻抗形成 126 Hz 左右的谐振电路，从而在谐波或其他激励源的作用下使电流、电压发散振荡。

3 解决方案的分析和验证

上一节中通过对变频器等效阻抗分析阐述了振荡产生的机理。但是仅仅从阻抗匹配的角度来提出解决方案是不够的，通过改变参数实现阻抗匹配的同时可能会对系统的其他部分造成影响，不能保证整个系统的稳定性。所以如果想要找到合理的解决方案，需要考虑到优化整个并网系统的频域模型。

由图 8 可知

$$\begin{cases} u_c = \left(\frac{Z_t}{N} + Z_s \right) i_t + u_s = Z_{sN}(s) i_t + u_s \\ i_L - i_t = \frac{u_s}{Zc(s)} \end{cases} \quad (16)$$

再结合式(12)和图 5 可画出 N 台风机运行时虚拟为一台变频器并网的控制框图如图 11 所示。

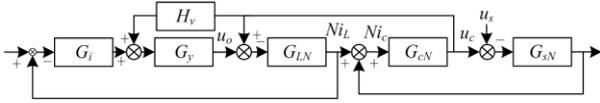


图 11 变频器并网系统控制框图

Fig. 11 Control block diagram of frequency converter grid connected system

图中 G_{LN} 、 G_{CN} 、 G_{SN} 的表达式分别为

$$\begin{cases} G_{LN} = \frac{N}{Ls} \\ G_{CN} = \frac{1}{NCs} \\ G_{SN} = \frac{1}{s\left(\frac{L}{N} + L_s\right)} = \frac{1}{sL_{sN}} \end{cases} \quad (17)$$

根据图 11 和式(17)可写出 N 台风机运行时虚拟为一台变频器并网系统时的开环传递函数，并化简得

$$G_o = \frac{(G_{LN} + G_{LN}G_{CN}G_{SN})G_iG_y}{1 + [G_{CN}G_{SN} + G_{LN}G_{CN}(1 - G_yH_v)]} \quad (18)$$

将式(1)、式(5)、式(17)代入并化简得

$$G_o = \frac{Ck_pL_s s^3 + Ck_iL_s s^2 + sk_p + k_i}{1.5T_sL_sLCs^5 + L_sLCs^4 + 1.5T_s\left(\frac{L}{N} + L_s\right)s^3 + \left[\frac{L}{N} + L_s(1 - H_v)\right]s^2} \quad (19)$$

对于已运行电站来说如果涉及到设备的更换和改造会增加很大的成本，并造成很多不确定性因素。所以如果能够通过调整可调参数来解决问题则对电站和系统都会更加有利。式(19)中涉及到的参数中只有前馈电压系数 H_v 和 PI 控制器比例系数 k_p 、积分系数 k_i 三个参数是可调参数。调整 k_p 和 k_i 对外环控制和机侧变频器控制的影响较大，一些文献的研究结果表明可能还会造成新的振荡因素^[30]。所以相对有效的办法是调整前馈电压系数 H_v ，对不同 H_v 值下的伯德图进行分析后，可知当 H_v 降低至 0.9 时系统的稳定裕度增大。

将 L 、 C 、 k_p 、 k_i 、 L_s 、 T_s 等参数取值代入式(19)，并分别绘制 $N = 25$ 时 H_v 取值 1 和 0.9 的伯德图如图 12 所示。

从图 12 中可以看出与调整前相比， H_v 调整后当幅频特性过零刻度线时，相频特性与 -180° 刻度线的距离明显增加，根据稳定判据，其稳定裕度也明显增加。

木格风电场根据此方案对风机的参数进行了调整，将风机从 1 台投运至 25 台，都没有再出现频率振荡的现象，然后在不同出力下对电压波形进行 FFT 分析，也没有再出现工频以外频率含量较大的情况。

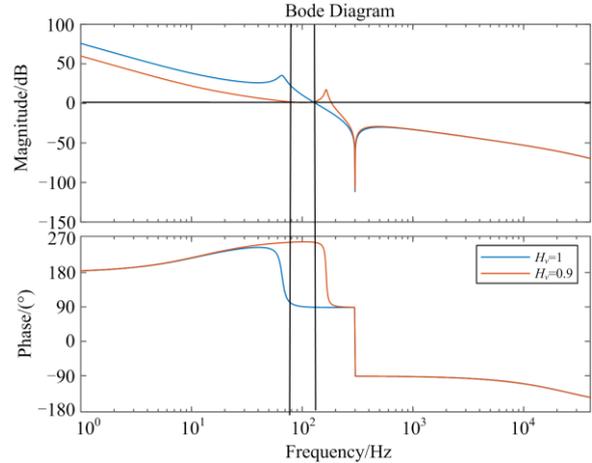


图 12 变频器并网系统开环传递函数伯德图

Fig. 12 Bode diagram of open loop transfer function for frequency converter grid connected system

4 结束语

随着风电场接入系统规模越来越大，一些不同于传统电力系统的问题逐渐显现。分析和解决此类问题对于保证电力系统安全稳定和新能源的持续发展来说是一项迫切而重要的工作。

本文通过对木格风电场高频振荡事故的分析，指明了此次故障产生的原因是风机网侧变频器等效阻抗和电网阻抗匹配造成的谐振，并提出了通过优化风机网侧变频器参数来解决频率振荡的方案。在没有对设备进行改造的前提下解决了木格风电场频率振荡问题，对于指导同类故障的处理有重要的指导意义。

参考文献

- [1] 杨肖虎, 罗剑波, 郁琛, 等. 适应大规模新能源并网的电力系统备用配置及优化综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 10-20, 63.
YANG Xiaohu, LUO Jianbo, YU Chen, et al. Review of power system reserve configuration and optimization for large-scale renewable energy integration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 10-20, 63.
- [2] 于淼, 汤亚芳, 黄亦欣, 等. 双馈风机控制方式对继电保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 180-187.
YU Miao, TANG Yafang, HUANG Yixin, et al. Research

- on the influence of control mode of DFIG on relay protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(2): 180-187.
- [3] 张露江, 汤会增, 张利, 等. 大型风机风向补偿算法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(19): 106-112.
ZHANG Lujiang, TANG Huizeng, ZHANG Li, et al. Research on the influence of control mode of DFIG on relay protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(19): 106-112.
- [4] TESHAGER B G, HAN Minxiao, PATROBERS S, et al. Direct power control strategy based variable speed pumped storage system for the reduction of the wind power fluctuation impact on the grid stability[C] // 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018), April 10-12, 2018, Doha, Qatar: 1-6.
- [5] NOURELDEEN O, HAMDAN I. Design of robust intelligent protection technique for large-scale grid-connected wind farm[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(2): 169-182. DOI: 10.1186/s41601-018-0090-4.
- [6] 李和明, 董淑惠, 王毅, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(5): 73-81.
LI Heming, DONG Shuhui, WANG Yi, et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(5): 73-81.
- [7] DU W, BI J, WANG T, et al. Impact of grid connection of large-scale wind farms on power system small-signal angular stability[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2015, 1(2): 83-89.
- [8] 谭谨, 王晓茹, 李龙源. 含大规模风电的电力系统小扰动稳定研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(3): 15-23.
TAN Jin, WANG Xiaoru, LI Longyuan. A survey on small signal stability analysis of power systems with wind power integration[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(3): 15-23.
- [9] 颜湘武, 李君岩. 基于主成分分析法的直驱式风电场分群方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(5): 127-133.
YAN Xiangwu, LI Junyan. Grouping method of direct drive wind farm based on principal component analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(5): 127-133.
- [10] 汪颖, 罗代军, 肖先勇, 等. 多逆变器并网下的超高次谐波特性分析[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(1): 192-199.
WANG Ying, LUO Daijun, XIAO Xianyong, et al. Analysis on supraharmonic resonance characteristics with integration of multiple inverters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(1): 192-199.
- [11] LI J, LIU C, ZHANG P F, et al. Difference between grid connections of large-scale wind power and conventional synchronous generation[J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(5): 486-493.
- [12] 郭小龙, 刘方蕾, 胥国毅, 等. 风电机组参与调频的虚拟惯量控制与快速频率控制[J]. *智慧电力*, 2020, 48(12): 1-7.
GUO Xiaolong, LIU Fanglei, XU Guoyi, et al. Virtual inertia control and fast frequency control of wind turbine participating in frequency regulation[J]. *Smart Power*, 2020, 48(12): 1-7.
- [13] 邢华栋, 张叔禹, 尹柏清, 等. 风电并网系统次同步振荡稳定性分析与控制方法研究综述[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(24): 13-21.
XING Huadong, ZHANG Shuyu, YIN Baiqing, et al. Review of subsynchronous oscillation stability analysis and control method for grid-connected wind farms in power system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(24): 13-21.
- [14] 陈洁, 郭志, 付翰翔, 等. 基于撬棒控制策略的 DFIG 风电场动态等值建模研究[J]. *高压电器*, 2020, 56(3): 190-196.
CHEN Jie, GUO Zhi, FU Hanxiang, et al. Research on dynamic equivalence modeling of wind farm composed of double fed induction generators based on crowbar control strategy[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(3): 190-196.
- [15] 张学广, 付志超, 陈文佳, 等. 弱电网下考虑锁相环影响的并网逆变器改进控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(7): 139-145.
ZHANG Xueguang, FU Zhichao, CHEN Wenjia, et al. An improved control method for grid-connected inverters considering impact of phase-locked loop under weak grid condition[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(7): 139-145.
- [16] 贾祺, 严干贵, 李泳霖, 等. 多光伏发电单元并联接入弱交流系统的稳定性分析[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(3): 14-20.
JIA Qi, YAN Gangui, LI Yonglin, et al. Stability analysis of multiple paralleled photovoltaic power generation units connected to weak AC system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(3): 14-20.

- [17] 杨德友, 李音璇, 楚帅, 等. 随机数据驱动下基于SDMD的机电振荡参数辨识[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 85-91.
YANG Deyou, LI Yinxuan, CHU Shuai, et al. Parameter identification of electromechanical oscillation based on SDMD driven by random data[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 85-91.
- [18] 张炳蔚. 风电并网的谐波动态模型研究及谐振分析[D]. 济南: 山东大学, 2019.
ZHANG Bingwei. Research on harmonic dynamic and resonance analysis of wind parks[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [19] 黄现莲, 冯向东, 张新闻. QPR控制器参数对变流器弱电网适应能力的影响[J]. 电气传动, 2020, 50(2): 28-34.
HUANG Xianlian, FENG Xiangdong, et al. The effect of the quasi proportional resonant controller's parameters on the adaptability of the converter to the weak grid[J]. Electric Drive, 2020, 50(2): 28-34.
- [20] 刘威, 谢小荣, 王衡, 等. 基于频率耦合阻抗模型的并网变流器全工况小信号稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7212-7221.
LIU Wei, XIE Xiaorong, WANG Heng, et al. Frequency-coupled impedance model-based small-signal stability analysis of grid-tied converters under all operating conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7212-7221.
- [21] 朱鑫要, 周前, 刘建坤, 等. 混合串补抑制双馈风电场次同步振荡研究[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 218-222, 229.
ZHU Xinyao, ZHOU Qian, LIU Jiankun, et al. Research on hybrid series compensation for suppression of SSO in doubly fed wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 218-222, 229.
- [22] 潘旭东, 黄豫, 唐金锐, 等. 新能源发电发展的影响因素分析及前景展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(11): 41-47.
PAN Xudong, HUANG Yu, TANG Jinrui, et al. Influencing factors and prospects for development of renewable energy power generation[J]. Smart Power, 2019, 47(11): 41-47.
- [23] COBRECES S, BUENO E, RODRIGUEZ F J, et al. Influence analysis of the effects of an inductive-resistive weak grid over L and LCL filter current hysteresis controllers[C] // Proceedings of European Conference on Power Electronics and Applications, September 2-5, 2007, Aalborg, Denmark: 1-10.
- [24] ABEYASEKERA T, JOHNSON C, ATKINSON D J, et al. Suppression of line voltage related distortion in current controlled grid connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(6): 1393-1401.
- [25] 电力系统安全稳定导则: GB38755—2019[S].
- [26] 葛延峰, 孙颖, 韩子娇, 等. 永磁同步风电机组的主动支撑控制及其在弱电网下的适应性分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 62-69.
GE Yanfeng, SUN Ying, HAN Zijiao, et al. Active support control strategy of permanent magnet synchronous wind turbine and its adaptability analysis under weak grid[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 62-69.
- [27] MATTAVELLI P, POLO F, LAGO F, et al. Analysis of control-delay reduction for the improvement of UPS voltage-loop bandwidth[J]. Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(8): 2903-2911.
- [28] 潘冬华, 阮新波, 王学华, 等. 提高LCL型并网逆变器鲁棒性的电容电流即时反馈有源阻尼方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 1-10.
PAN Donghua, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. A capacitor-current real-time feedback active damping method for improving robustness of the LCL-type grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 1-10.
- [29] 邓王博, 王海云, 常喜强, 等. 大规模双馈风电场次同步振荡的成因分析[J]. 高压电器, 2019, 55(9): 215-221.
DENG Wangbo, WANG Haiyun, CHANG Xiqiang, et al. Cause analysis on subsynchronous oscillation in large-scale doubly-fed wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 215-221.

收稿日期: 2020-12-13; 修回日期: 2021-03-09

作者简介:

李亦伦(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向电力系统继电保护。E-mail: liyulun@cgnpc.com.cn

(编辑 周金梅)