双馈风电并网系统高频谐振机理及抑制策略

刘其辉1,董楚然1,于一鸣2

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206;2. 国网山东省济南供电公司,山东 济南 250012)

摘要:双馈风电机组并网时,由于机网相互作用可能会发生高频谐振,造成巨大的经济损失。针对该问题,首先,综合考虑机侧变流器和网侧变流器的影响,建立双馈风电机组的阻抗模型,并考虑风机接入电网时所采用的不同补偿方式建立双馈风电并网系统阻抗模型,通过绘制和分析阻抗频率响应曲线,揭示双馈风电并网系统高频谐振的产生机理;然后,借鉴光伏逆变器高频谐振抑制的思想,在机侧变流器和网侧变流器原有控制策略中附加阻尼控制环节进行阻抗重塑,以实现风电并网系统高频谐振的有效抑制;最后,通过仿真验证了所提策略的合理性与有效性。

DOI:10.16081/j.epae.202007018

0 引言

近年来,风电装机容量日益增加,给电网稳定性 带来了许多挑战^[13]。2012年,德国北海风电场发生 2230 Hz高频谐振,导致换流站电容烧毁,50台风机 无法并网,造成巨大经济损失;2013年2月,新疆某 风电场出现20次谐波谐振,导致部分风电机组自行 解列;2013年4月,广东某风电场发生13次谐波谐 振,导致风电场继电保护动作,以致风电场被整体切 除^[4]。预计随着风电占比的提高,高频谐振问题将 越来越显著,因此迫切需要研究风电并网系统高频 谐振的机理与抑制策略。

目前,已有部分文献对风电场的谐振现象进行 了研究。文献[5]分析了不同工况对风电场谐振频 率的影响,但在分析过程中仅考虑了感应电机的阻 抗,忽略了变流器及其控制;文献[6]利用模态分析 法研究了丹麦Horns Rev风电场中电缆对谐振点的 影响,但也缺乏对变流器的充分考虑;文献[7]通过 建立长线路的阻抗模型,利用灵敏度分析了弱电网 环境下的风电场谐振问题。已有文献均未系统地阐 明风电场高频谐振的机理,且在建模时为降低复杂 程度,通常直接将变流器等效为受控源,或忽略网侧 变流器 GSC(Grid-Side Convertor),或忽略变流器电 流环的耦合补偿项和定、转子漏感,而高频情况下两 变流器的电抗随频率变化明显,工频下电流环的耦 合项系数很小以及定、转子漏感远小于励磁电感的 结论不再成立。

收稿日期:2019-12-16;修回日期:2020-05-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904000,2018-YFB0904003);国家电网公司科技项目(SGJB0000TKJS1801242) Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFB0904000,2018YFB0904003) and the Science and Technology Project of SGCC(SGJB0000-TKJS1801242) 现有的文献中关于风电机组高频谐振抑制策略 的研究较少,相比较而言关于光伏并网逆变器高频 谐振抑制的研究较多。早期通常采用无源阻尼的方 式,通过串联电阻来抑制谐振,但由于能耗过高已逐 渐被淘汰。文献[8-9]针对含LCL型滤波器的光伏 并网逆变器,在控制策略中加入有源阻尼信号,从而 抑制高频谐振;文献[10]针对弱电网环境下的光伏 逆变器,提出一种导纳重构策略,以提高系统对电网 阻抗变化的适应能力,实现对谐波谐振的抑制。除 了改变变流器控制策略,还可以增加辅助设备或装 置来抑制高频谐振,文献[11]针对多并网逆变器的 谐振抑制,采用在公共耦合点(PCC)处加装谐振抑 制单元的方法,并验证了该方法的正确性。

为此,本文首先用小信号线性化方法,考虑双馈 感应发电机 DFIG(Doubly-Fed Induction Generator) 机侧变流器 MSC(Machine-Side Convertor)和GSC的 外部阻抗特性,并考虑高频的特殊性,以各变流器电 流控制环节为基础,计及了发电机励磁电感、GSC滤 波电感以及两变流器的电流环耦合补偿项、电压前 馈项等,按3种无功补偿方式下 DFIG并网系统结 构,建立了较为实用的、精确的阻抗模型,分析双馈 风电并网系统高频谐振的产生机理;然后,借鉴光伏 逆变器高频谐振抑制的原理,在双馈风机的 MSC、 GSC 控制策略中附加阻尼控制环节对双馈风电系统 进行阻抗重塑,以实现高频谐振的抑制;最后,通过 仿真验证该策略的有效性。

1 双馈风电并网系统阻抗模型

为提高风电并网系统的运行特性和控制能力, 一般采用串联电容或并联电容对线路参数或无功功 率进行补偿,因此本文考虑串联电容补偿、并联电容 补偿和无补偿这3种补偿方式的风电并网系统。不 同补偿方式下的并网系统如图1所示,双馈风电系统PCC连接不同电网。其中,并联补偿多用于配电网,线路电阻不可忽略,而串联补偿和无补偿方式一般用于输电网,线路电阻可以忽略不计。



图1 不同补偿方式下的双馈风电并网系统

Fig.1 Doubly-fed wind power grid-connected system with different compensation forms

现有文献中,阻抗法被广泛用于分析双馈风电 并网系统的次同步振荡^[12-13],同理,针对双馈风电并 网系统的高频谐振问题,也可以通过建立阻抗模型 并绘制其 Bode 图来分析高频谐振的产生机理。为 此,本文首先建立双馈风电并网系统阻抗模型,包括 双馈风电系统阻抗模型和不同补偿方式下的电网阻 抗模型。

在建立双馈风电并网系统阻抗模型时采用以下 假设:不考虑变压器等电磁元件的磁饱和效应;变流 器的解耦项针对基波电流进行设计;电网的阻抗等 效为RLC模型。

1.1 双馈风电系统阻抗建模

GSC 和 MSC 通过直流电压耦合,直流电压由 GSC 控制,当直流电压发生变化时会对 MSC 的控制 产生影响。但是直流电压的控制时间尺度比较 大,其频段一般在 1~10 Hz^[12],而双馈风电并网系统 的高频谐振一般发生在几百到几千 Hz(一般不超过 2 kHz),所以在研究高频谐振时,可以认为直流电压 保持恒定,2个变流器相互解耦,此时双馈风电系统 阻抗可看作由 GSC 支路阻抗和机侧变流器--双馈感 应发电机(MSC-DFIG)支路阻抗构成。另外,本文还 忽略了数 kHz 以上的电力电子器件开关过程,重点 考虑了在本文研究频段范围内的变流器电流控制动 态特性。

1.1.1 GSC 支路阻抗模型

GSC采用电网电压定向矢量控制策略,忽略电 压外环,认为电流内环参考值为常数。

附录中图A1(a)为GSC电流内环矢量控制框图。图中,*i*_{adref},*i*_{agref}分别为GSC的*d*,*q*轴电流指令

值; i_{gd} 、 i_{gn} 分别为GSC的d、q轴电流实际值; $G_g(s)$ 为GSC电流内环PI控制器传递函数; K_g 为电流内环解 耦补偿项系数; v_{gdref} 、 v_{ggref} 为GSC的d、q轴输出电压指 令; U_g 为电网电压。 $G_g(s)$ 和 K_g 的表达式分别为:

$$G_{\rm g}(s) = k_{\rm gp} + \frac{k_{\rm gi}}{c} \tag{1}$$

$$=\omega_{\rm s}L_{\rm f}$$
 (2)

其中, k_{gp} 、 k_{gi} 分别为GSC电流内环PI控制的比例、积 分参数; L_f 为GSC侧滤波电感; ω_s 为同步角速度。

 K_{a}

根据附录中图 A1(a) 所示的控制策略,可以得到 dq 坐标系下 GSC 输出电压与电流的关系为:

$$\begin{cases} v_{gdref} = -(i_{gdref} - i_{gd})G_{g}(s) + K_{g}i_{gq} + U_{s} \\ v_{gqref} = -(i_{gqref} - i_{gq})G_{g}(s) - K_{g}i_{gd} \end{cases}$$
(3)

忽略变流器的延时,即认为 GSC 的输出电压与 电压指令值相同,可将式(3)合成为 dq 坐标系下的 矢量形式:

 $V_{gdq} = U_s - I_{gdqref}G_g(s) + (G_g(s) - jK_g)I_{gdq}$ (4) 其中, V_{gdq} 、 I_{gdq} 分别为 dq坐标系下 GSC 的电压、电流 矢量; I_{sdqref} 为 GSC 的电流参考矢量。

根据拉普拉斯变换,可得 *abc* 坐标系下电压电 流矢量关系式为:

 $V_{g} = U_{s} - I_{gref} G_{g}(s-j\omega_{s}) + (G_{g}(s-j\omega_{s})-jK_{g})I_{g}$ (5) 其中, V_{g} , I_{g} 分别为 *abc* 坐标系下 GSC 电压、电流矢 量; I_{gref} 为 *abc* 坐标系下 GSC 的电流参考矢量。

由式(5)可以得到 GSC 阻抗等效电路如附录中 图 A2(a) 所示。图中, $V_{GSC} = U_s - I_{gref} G_g(s-j\omega_s)$, 为 GSC 的等效受控电压源; $Z_{GSC} = G_g(s-j\omega_s) - jK_g$, 为 GSC 的阻抗。

再计及 GSC 交流侧滤波器电感 *L*_r, GSC 支路的 阻抗表达式为:

$$Z_{g} = G_{g}(s - j\omega_{s}) - jK_{g} + sL_{f}$$
(6)

需要说明的是,在本文研究的频段范围内,电压 源连接集中电感和连接分布式参数模型的阻抗特性 高度吻合,且现有新能源并网系统高频谐振问题的 研究均采用集中式模型^[9,14],因此上述电压源连接 集中电感的模型适用于本文的分析。

1.1.2 MSC-DFIG 支路阻抗模型

由于直流电容使MSC、GSC相互解耦,因此可以将MSC与发电机当作整体进行考虑。

对于 MSC 的阻抗建模, 在定子电压定向矢量控 制策略下, MSC 电流内环矢量控制框图如附录中图 A1(b)所示。图中, i_{rdref} , i_{rqref} 和 i_{rd} , i_{rq} 分别为 MSC 的d、 q轴电流指令值和实际值; v_{rdref} 、 v_{rqref} 分别为 GSC 的d、 q轴输出电压指令值; σ 为发电机漏磁系数; L_s 、 L'_r 、 L_m 分别为定子电感、折算后的转子电感和励磁电感; ω_n 为转差角速度; $G_m(s) = k_{mp} + k_{mi}/s$, 为 MSC 电流内环 PI 控制器的传递函数。采用与 GSC 阻抗建模相同的 思路,可以得到MSC的阻抗为:

$$Z_{\rm MSC} = G_{\rm m} \left(s - j\omega_{\rm s} \right) - jK_{\rm m} \tag{7}$$

其中, K_m 为转子电流解耦补偿系数。因 $\omega_n L_m U_s / (\omega_s L_s)$ 项数值很小,忽略该项得 $K_m = \omega_s \sigma L'_r$ 。

将Z_{MSC}进行频率与绕组折算后可得:

$$Z'_{\rm MSC} = \left(\frac{N_{\rm s}}{N_{\rm r}}\right)^2 \frac{G_{\rm m}(s-j\omega_{\rm s}) - jK_{\rm s}}{s_{\rm slip}}$$
(8)

其中, N_s 、 N_r 分别为定、转子绕组匝数; s_{slip} 为转差率的频域表达, $\exists s_{slip} = (s - j\omega_m)/s, \omega_m$ 为转子角速度。

MSC 连接于 DFIG 转子电路,将式(8)所表示的 MSC 阻抗与 DFIG 等效电路相结合,得到 MSC-DFIG 支路阻抗模型,如附录中图 A2(b)所示。图中, R_s 、 $L_{\sigma s}$ 分别为发电机定子电阻和定子漏感; R'_r 、 $L'_{\sigma r}$ 分别 为折算后的发电机转子电阻和转子漏感。

考虑到发电机等效电路的电感有时无法满足 L'_{or}~L_{or}、«L_m,故本文考虑励磁电感的影响。因此,从 DFIG定子端看进去的MSC-DFIG支路阻抗为:

$$Z_{\rm sr} = R_{\rm s} + sL_{\sigma \rm s} + (sL'_{\sigma \rm r} + R'_{\rm r} + Z'_{\rm MSC}) // sL_{\rm m}$$
(9)

1.1.3 双馈风电系统阻抗模型

根据建立的GSC支路与MSC-DFIG支路的阻抗 模型,可以得到双馈风电系统阻抗模型如图2所示。 由于直流电容的解耦作用,GSC与MSC-DFIG的2条 支路为阻抗并联关系。从PCC处看进去的双馈风电 系统整体阻抗为:

$$Z_{\rm DFIG} = Z_{\rm g} / / Z_{\rm sr} = \frac{Z_{\rm g} Z_{\rm sr}}{Z_{\rm sr} + Z_{\rm g}}$$
(10)
$$\frac{R'_{\rm r}}{Z'_{\rm MSC}} \frac{L'_{\rm \sigma r}}{L_{\rm \sigma s}} \frac{L_{\rm \sigma s}}{R_{\rm s}} \frac{I_{\rm grid}}{I_{\rm f}}$$

 $\Box Z_{GSC}$

 $\sim V_{\rm GSG}$

图2 双馈风电系统阻抗模型

 L_n



1.2 不同补偿方式下电网阻抗建模

 $V'_{\rm MSC}$

根据图1,得到采用串联电容补偿、并联电容补偿、无补偿这3种电网的阻抗模型分别为:

$$Z_{\rm Net1} = \frac{L_{\rm g} s^2 + \frac{1}{C_{\rm g}}}{s}$$
(11)

$$Z_{\text{Nei2}} = \frac{\frac{1}{C_{\text{g}}}s + \frac{R_{\text{g}}}{L_{\text{g}}C_{\text{g}}}}{s^{2} + \frac{R_{\text{g}}}{L_{\text{g}}}s + \frac{1}{L_{\text{g}}C_{\text{g}}}}$$
(12)

$$Z_{\rm Net3} = L_{\rm g}s \tag{13}$$

其中, $R_g = R_{line} + R_T$, $L_g = L_{line} + L_T$, $R_{line} \setminus L_{line}$ 为系统线路

的阻抗集总参数, R_{T} 、 L_{T} 为变压器阻抗参数; C_{g} 为补偿电容。

2 双馈风电并网系统高频谐振机理

由文献[15]可知,双馈风电系统会与串联补偿 电网阻抗交互作用引发次同步振荡,高频谐振的产 生机理与之类似。分别绘制双馈风电系统和电网的 阻抗 Bode 图,通过两者的频域特性可以分析高频谐 振机理。

2.1 双馈风电系统和电网的阻抗特性

根据双馈风电系统的阻抗模型,分别绘制 Z_{DFIG} 、 Z_{st} 、 Z_{g} 的阻抗Bode 图如附录中图A3所示。从图中可以得知,双馈风电系统在高频区域(>500 Hz)的相位响应为90°,呈现电感特性。

根据式(11)一(13),绘制3种电网阻抗Bode图如附录中图A4所示。对于无补偿和串联补偿电网, 在高频范围内其相位响应接近90°,呈现电感特性。 在并联补偿方式下,电网阻抗在高频段内的相位响 应为-90°,呈现电容特性。

2.2 双馈风电并网系统高频谐振分析

根据阻抗稳定性理论^[16],并网系统的稳定性取 决于其输出阻抗和电网阻抗在幅值交点处的相位裕 度。在高频段,双馈风电系统呈现电感特性,若其与 电网阻抗的相位差接近180°,且在该频段范围内具 有幅值交点,则会产生高频谐振^[14,17]。因此,当双馈 风电系统接入呈现电容特性的并联补偿电网时,二 者相位响应接近180°,可能发生高频谐振。值得一 提的是,在采用电缆输电的海上风电中,电网阻抗存 在等效电容,在这种情况下,即使没有并联补偿, DFIG也可能产生高频谐振,但是当反映在电网等效 电路上时,与并联补偿电网的形式并无差别,因此本 文以并联补偿参与高频谐振的情况为例分析其振荡 机理。

图 3 同时给出了双馈风电系统与并联补偿电网的阻抗 Bode 图。可见 2 个阻抗的幅值响应曲线在



图3 双馈风电系统与并联补偿电网的阻抗Bode图

Fig.3 Bode diagram of impedance for doubly-fed wind power system and parallel compensation grid 1 kHz频率点相交处相位差达到了180°,在机网阻抗 的交互作用下,在该频率附近会发生高频谐振。

并联补偿电容容值发生变化会影响双馈风电 并网系统的高频谐振频率,图4为采用不同并联 补偿电容容值的双馈风电并网系统阻抗 Bode 图,并 网系统的谐振频率受电容容值影响发生偏移。由图 可知,阻抗幅频曲线的左侧交点集中在100 Hz附 近,两系统相位响应分别为90°与-45°,不构成谐 振的发生条件;右侧交点处(交点频率分别对应1 000、1350、1830 Hz)两系统的相位响应分别为90° 与-90°,会发生高频谐振,且随着补偿电容容值的 增大,谐振频率减小。



-----补偿电容为20μF的电网, -----补偿电容为10μF的电网

图4 双馈风电系统与不同补偿容量电网的阻抗 Bode 图

Fig.4 Bode diagram of impedance for doubly-fed wind power system and grids with different compensation capacities

双馈风电并网系统高频谐振抑制 3

光伏发电单元发生谐振时,在变流器控制信号 中增加阻尼信号可以抑制谐振^[9,18],该思路可以引 入双馈风电并网系统高频谐振抑制中。双馈风电系 统与并联补偿电网交互作用发生高频谐振时,并网 系统的阻尼最低,可以在风电变流器电流内环针对 谐振频率加入有源阻尼环节,对阻抗进行重塑,通过 破坏谐振条件抑制谐振。

3.1 GSC 附加阻尼控制策略

GSC电流内环控制结构包括PI控制环节、变流 器延时环节、滤波器环节,其控制结构框图如图5虚 线框以外部分所示(以q轴为例,d轴类似),图中T。





inner loop control

为变流器延迟时间常数。

附加阻尼控制的原理是通过对电流反馈信号的 处理,修正电压指令,实现阻抗重塑。为了不影响基 频控制性能,需要对电流反馈信号进行滤波处理。 图5虑线框所示为加入的附加阻尼控制环节,图中 G_{sp}(s)为附加阻尼信号的带通滤波器环节,其传递 函数如式(14)所示。

$$G_{\rm SD}(s) = \frac{ks/\omega_{\rm c}}{(s/\omega_{\rm c})^2 + 2\zeta s/\omega_{\rm c} + 1}$$
(14)

其中,k为带通滤波器放大增益, 取 $k=\sqrt{2}$; ζ 为阻尼 比,取 ζ =0.707; ω ,为滤波器截止频率,由于双馈风 电并网系统发生1kHz高频谐振时,在dq坐标系下 对应的谐波频率为950 Hz,因此取 ω_{e} =950 Hz。

根据附加阻尼控制策略,在控制系统中通过带 通滤波器 G_{sp}(s)提取 GSC 电流的高频谐波分量并生 成阻尼电压信号:

$$\begin{cases} \Delta u_{gd} = G_{SD}(s)i_{gd} \\ \Delta u_{gq} = G_{SD}(s)i_{gq} \end{cases}$$
(15)

加入阻尼信号后的参考电压信号为:

$$\begin{cases} v_{gdref} = -(i_{gdref} - i_{gd})G_g(s) + \omega_s L_f i_{gq} + U_s - \Delta u_{gd} \\ v_{gqref} = -(i_{gqref} - i_{gq})G_g(s) - \omega_s L_f i_{gd} - \Delta u_{gq} \end{cases}$$
(16)

改进后的GSC的阻抗模型可表示为:

$$Z_{\rm GSC} = G_{\rm g}(s - j\omega_{\rm s}) - j\omega_{\rm s}L_{\rm f} - G_{\rm SD}(s - j\omega_{\rm s}) \qquad (17)$$

由式(17)可知,加入附加阻尼控制相当于在 GSC支路中串联一个虚拟阻抗 $Z_{GSC}^* = -G_{SD}(s-j\omega_s)$,以 实现阻抗重塑,其等效电路如附录中图A5(a)所示。

3.2 MSC 附加阻尼控制策略

MSC采用与GSC类似的附加阻尼控制。由于转 子电流频率会变化,因此在MSC的附加阻尼控制策 略中,通过带通滤波器 Gsp(s)提取定子电流分量中 的高频谐波信号并生成阻尼电压信号 Δu_{u} , Δu_{v} ,阻 尼电压信号的表达式为:

$$\begin{cases} \Delta u_{rd} = G_{SD}(s) i_{sd} \\ \Delta u_{rq} = G_{SD}(s) i_{sq} \end{cases}$$
(18)

加入阻尼信号后参考电压信号为:

$$v_{rdref} = (i_{rdref} - i_{rd})G_{m}(s) + \omega_{n} \left(\frac{L_{m}}{\omega_{s}L_{s}}U_{s} - \sigma L'_{r}i_{rq}\right) - \Delta u_{rd}$$
(19)

 $v_{\text{raref}} = (i_{\text{raref}} - i_{\text{ra}})G_{\text{m}}(s) + \omega_{s}\sigma L'_{r}i_{rd} - \Delta u_{rd}$

经过频率和绕组折算,采用附加阻尼控制后 MSC的阻抗模型可表示为:

$$\tilde{Z}_{\rm MSC}' = \left(\frac{N_{\rm s}}{N_{\rm r}}\right)^2 \frac{G_{\rm m}(s-{\rm j}\omega_{\rm s}) - {\rm j}\omega_{\rm s}\sigma L_{\rm r}'}{s_{\rm slip}} + \frac{N_{\rm s}}{N_{\rm r}} \frac{G_{\rm SD}(s-{\rm j}\omega_{\rm s})}{s_{\rm slip}}$$
(20)

由式(20)知,加入附加阻尼控制相当于在MSC支 路中串联一个虚拟阻抗(Z'_{MSC})*= $N_s G_{SD}(s-j\omega_s)/(N_r s_{slip})$, 以实现阻抗重塑,其等效电路图如附录中图A5(b)

所示。

加入附加阻尼控制后的双馈风电系统 MSC、 GSC 控制策略如图6所示。

3.3 加入附加阻尼控制的系统阻抗特性

根据以上分析可得加入附加阻尼控制后GSC支路、MSC-DFIG支路以及双馈风电系统阻抗表达式分别为:

$$\tilde{Z}_{\rm g} = \tilde{Z}_{\rm GSC} + sL_{\rm f} \tag{21}$$

$$\tilde{Z}_{\rm sr} = R_{\rm s} + sL_{\sigma \rm s} + (sL'_{\sigma \rm r} + R'_{\rm r} + \tilde{Z}'_{\rm MSC}) // sL_{\rm m} \qquad (22)$$

$$\tilde{Z}_{\rm DFIG} = \tilde{Z}_{\rm g} // \tilde{Z}_{\rm sr} = \frac{Z_{\rm g} Z_{\rm sr}}{\tilde{Z}_{\rm sr} + \tilde{Z}_{\rm g}}$$
(23)

在GSC与MSC引入附加阻尼环节后,双馈风电并网系统阻抗Bode图如图7所示。

对比图7与图3可以看出,原本在1kHz处发生 高频谐振的系统,通过在变流器控制策略中加入阻 尼环节,双馈风电系统频率响应曲线在1kHz处的 相位变为75°,与并联补偿电网的相位差无法达到 180°,即无法满足谐振发生的条件,从而有效抑制了 谐振。

4 算例分析

采用PSCAD搭建了图1所示的并联补偿电网下 双馈风电并网系统的仿真模型,对所提的附加阻尼 策略进行验证。电网参数如附录中表A1所示,发电 机及变流器参数如附录中表A2所示。设双馈风机 工作在单位功率因数状态下,风速为10.5 m/s,运行 在最大功率跟踪区。给定采样延时T_s=0.0003 s,仿 真时长为5 s,仿真步长为10 μs。使用传统矢量控 制与改进控制后的双馈风电并网系统发生高频谐振 时的仿真波形如图8—10所示。

图 8 显示了附加阻尼控制前后变流器的电流控制信号追踪情况(以 GSC 的 q 轴电流为例)。可以看









图 8 传统控制与附加阻尼控制下GSC的 q轴电流跟踪情况

Fig.8 GSC q-axis current reference value and actual value under traditional control and additional damping control

出双馈风电并网系统发生高频谐振时,变流器控制 信号中出现大量扰动,无法对参考值进行追踪,导致 变流器向电网输出的电流谐波含量增加;采用附加 阻尼控制后,变流器控制信号得到明显改善。

图 9(a)显示了谐振抑制前后 PCC 处输出电流 的波形。可见传统矢量控制下,双馈风电系统阻抗 与并联补偿电网阻抗交互作用产生高频谐振,DFIG



图6 双馈风电并网系统附加阻尼控制策略

Fig.6 Additional damping control strategy for doubly-fed wind power grid-connected system



168



Fig.9 Output currents at PCC under traditional control and additional damping control





定子输出电流中包含基波与20次谐波分量,电流出现明显畸变;加入阻尼信号后,发电机定子输出电流 谐波含量明显降低,对比图9(b)所示的谐波频谱, 20次谐波的幅值由8.7×10⁻³ kA降低至8.1×10⁻⁵ kA, 证明改进后的控制策略能有效抑制双馈风电并网系 统的高频谐振。

图 10显示了谐振抑制前后 PCC 处输出的有功 功率。可以看出当双馈风电并网系统发生高频谐振 时, DFIG 输出有功功率出现明显波动; 加入附加阻 尼控制后, 输出有功功率波形平滑, 得到了明显 改善。

5 结论

本文通过建立双馈风电并网系统的阻抗模型, 利用频率响应关系探究双馈风电并网系统高频谐振 机理,并针对高频谐振抑制提出基于矢量控制的附加阻尼控制,基于PSCAD仿真验证了所提控制策略的正确性和有效性,得到以下的结论。

(1)双馈风电并网系统的高频谐振是由于双馈 风电系统阻抗与并联补偿电网阻抗交互作用产生 的,且电网并联补偿容量越小,谐振频率越高。当在 某一频率下双馈风电系统相位响应为90°(呈电感 性),并联补偿电网相位响应为-90°(呈电容性),即 两系统相位差达到180°时,会产生高频谐振现象。

(2)提出基于附加阻尼控制环节的高频谐振抑 制方法,其能够有效抑制高频谐振的发生。通过带 通滤波器提取变流器电流高频信号,调整电压指令 实现阻抗重塑,使双馈风电并网系统高频段相位无 法满足谐振发生条件,从而抑制谐振。

(3)所提的附加阻尼控制相较于传统的加入实际电阻不同,加入实际电阻将产生热损耗,损失功率,而附加阻尼控制环节仅在发生谐振时发挥作用,不会对正常情况下的运行特性和输出功率产生影响。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

 [1]廖坤玉,肖湘宁,罗超,等.基于VSC的双馈风电场群宽频带次 同步谐振抑制作用分析与实验[J].电力自动化设备,2019,39 (10):71-79.

LIAO Kunyu, XIAO Xiangning, LUO Chao, et al. Effect analysis and experiment of broadband sub-synchronous resonance suppression of DFIG-based wind farm groups based on VSC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10):71-79.

- [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 Zheng,LUO Huiqun,ZHU Ruijin. Review on methods of analysis for subsynchronous oscillations of power systems[J]. Power System Technology,1999,23(6):36-39.
- [3] 高本锋,李忍,杨大业,等.双馈风电机组次同步振荡阻尼特性 与抑制策略[J].电力自动化设备,2015,35(12):11-20.
 GAO Benfeng,LI Ren,YANG Daye, et al. Damping characteristics and countermeasure of DFIG sub-synchronous oscillation
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):11-20.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.



- [7] 陈畅,杨洪耕.风火打捆半波长交流输电系统的谐振分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):50-57,64.
 CHEN Chang, YANG Honggeng. Harmonic resonance analysis for wind-thermal-bundled half-wavelength AC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 50-57,64.
- [8] 方刚,杨勇,卢进军,等.三相光伏并网逆变器电网高阻抗谐振 抑制方法[J].电力自动化设备,2018,38(2):109-116.
 FANG Gang, YANG Yong, LU Jinjun, et al. Resonance suppression method of high impedance power grid for threephase photovoltaic grid-connected inverters[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(2):109-116.
- [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):4547-4558. 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):4547-4558.
- [10] 郑晨,周林,张密. 基于导纳重构的大型光伏电站谐波谐振抑 制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):51-57.
 ZHENG Chen, ZHOU Lin, ZHANG Mi. Harmonic resonance suppression based on admittance reshaping for large-scale PV plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 51-57.
- [11] 黄亚申.并网逆变器谐振机理及抑制研究[D]. 合肥:合肥工 业大学,2017.
 HUANG Yashen. Research on resonance mechanism and suppression of grid-connected inverter[D]. Hefei: Hefei University of Technology,2017.
- [12] VIETO I, SUN J. Impedance modeling of doubly-fed induction generators[C] //European Conference on Power Electronics and Applications. Geneva, Switzerland: IEEE, 2015:1-10.

- [13] VIETO I, SUN J. Damping of sub-synchronous resonance involving type-Ⅲ wind turbines[C]//Control and Modeling for Power Electronics. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2015: 1-8.
- [14] SONG Y, WANG X, BLAABJERG F. Impedance-based highfrequency resonance analysis of DFIG system in weak grids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (5): 3536-3548.
- [15] SONG W, JIAO S, LI Y W, et al. High-frequency harmonic resonance suppression in high-speed railway through singlephase traction converter with LCL filter[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2(3): 347-356.
- [16] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26 (11):3075-3078.
- [17] SONG Y, BLAABJERG F, WANG X. Analysis and comparison of high frequency resonance in small and large scale DFIG system[C]//2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Milwaukee, USA: IEEE, 2016: 18-22.
- [18] YUN W L. Control and resonance damping of voltage-source and current source converters with LC filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5):1511-1521.

作者简介:



刘其辉(1974—),男,山东济南人,副 教授,博士,主要研究方向为新能源发电与 并网技术(E-mail:liuqihuifei@163.com); 董楚然(1996—),女,江苏南通人,硕 士研究生,主要研究方向为风力发电建模与 控制(E-mail:dcr325@126.com)。

刘其辉

(编辑 李玮)

High frequency resonance mechanism and suppression strategy of doubly-fed wind power grid-connected system

LIU Qihui¹, DONG Churan¹, YU Yiming²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Jinan Power Supply Company, State Grid Shandong Power Grid Co., Ltd., Jinan 250012, China)

Abstract: The high frequency resonance as DFIG(Doubly-Fed Induction Generator) integrated into the power grid can result in huge economic losses. To deal with this issue, firstly, the impact of both machine-side and grid-side converters is considered. The impedance model of DFIG is established, and the impedance model of the doubly-fed wind power grid-connected system is developed, in which the different compensation types are considered. By plotting and analyzing the curve of impedance frequency response, the mechanism of high-frequency resonance for the doubly-fed wind power grid-connected system is revealed. Subsequently, the additional damping control is introduced to both machine-side and grid-side converters by impedance reshaping, which utilizes the suppression strategy of high frequency resonance of photovoltaic inverters. Finally, the rationality and effectiveness of the suppression strategy are verified by simulation.

Key words: doubly-fed induction generator; impedance modeling; high frequency resonance; resonance suppression; electric converters



(b) MSC 电流内环控制框图 图 A1 变流器电流内环控制框图

Fig.A1 Converter inner loop control block diagram



Fig.A2 Impedance model of each branch







图 A5 加入附加阻尼控制后各支路阻抗模型

Fig.A5 Impedance model of each branch after adding additional damping control

表 A1 电网阻抗基本参数 Table A1 Grid impedance parameters		
参数	数值	
并补电网电阻/mΩ	0.01	
并补电网电感/mH	0.08	
并联补偿电容/μF	30	

Tuble T12 Generator and converter parameters				
	参数	数值	参数	数值
	额定功率/MW	5	GSC 电流环比例系数	1.15
	额定电压/V	690	GSC 电流环积分系数	10000
	互感/p.u.	4	RSC 电流环比例系数	0.5
	定子电阻/p.u.	0.006	RSC 电流环积分系数	2
	转子电阻/p.u.	0.006	PLL 比例系数	50
	定子漏感/p.u.	0.10	PLL 积分系数	900
	转子漏感/p.u.	0.11	额定风速/(m s ⁻¹)	10.5
_	匝数比	0.3	直流电容/μF	1700

表 A2 发电机及变流器参数 Table A2 Generator and converter parameters