

计及风电场侧谐波阻抗影响的谐波发射水平评估

谭 鹏, 杨洪耕, 马晓阳, 徐方维
(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 风机滤波器和无功补偿装置导致风电场侧谐波阻抗并非远大于系统侧谐波阻抗, 因此在计算风电场侧谐波电压发射值时, 不可忽略风电场侧谐波阻抗的影响。提出一种基于改进复线性回归方程的风电场谐波发射水平评估方法。从公共连接点(PCC)谐波电压中分解出与回归方程系数无关的风电场谐波电流分量, 据此建立复线性回归方程, 采用复最小二乘法计算系统侧谐波阻抗, 计及风电场侧谐波阻抗计算风电场侧谐波发射水平。针对风电场集电网络拓扑结构的多变性, 提出一种集电网络聚合等值方法, 将混联结构的集电网络聚合为 T 形结构的网络计算风电场侧谐波阻抗, 并利用分散参数的误差边际效应对误差进行分析。仿真和实测数据验证了所提方法的有效性。

关键词: 风电; 复线性回归; 风电场侧谐波阻抗; 聚合等值; 谐波发射水平

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.025

0 引言

风电场公共连接点 PCC(Point of Common Coupling)的谐波是由风电场内部和外部电网谐波源(作为 PCC 背景谐波)共同作用的结果。背景谐波具有不确定性且通常不可测量, 当背景谐波较大时, 不能认为 PCC 谐波电压都由风电场谐波源所产生, 有必要根据现场谐波测量情况评估风电场在其 PCC 的谐波污染责任, 其前提是评估 PCC 两侧的谐波发射水平^[1-2]。

国内外学者对谐波发射水平评估方法进行了大量的研究。文献[3-4]提出用户侧和系统侧参考阻抗的方法, 但由于系统侧发电机、负荷和用户侧负荷的运行情况处于变化之中, 难以精确计算参考阻抗值。因此, 产生了基于测量数据的“非干预式”谐波发射水平评估方法, 包括波动量法^[5]、回归法^[6-7]、随机独立矢量法^[8]、极大似然估计法^[9]和独立分量法^[10]等。文献[11]提出了复线性最小二乘法, 该方法保持复数回归模型的严格线性关系, 在复数域中计算回归模型的最小二乘解, 弥补了在实数域中计算回归模型最小二乘解的不足。上述方法均假设用户侧谐波阻抗远大于系统侧谐波阻抗, 所以在计算用户侧谐波发射水平时忽略了用户侧谐波阻抗。对于典型工业非线性用户(工业整流负荷、电弧炉等), 上述假设成立, 但是风机逆变器出口均配置滤波器、集电点配置无功补偿装置, 风电场侧谐波阻抗可能并没有远大于系统侧谐波阻抗, 因此不能忽略风电场侧谐波阻抗的影响。

风电场侧谐波阻抗主要由逆变器出口外的滤波

器、变压器、线路和无功补偿电容器等元件决定, 其均具有确定的谐波阻抗模型。同类型相同容量风机所配备的 LCL 滤波器的参数基本一致, 仅每台风机至集电点的线路长度存在分散性, 据此可简化集电网络的结构, 计算等值谐波阻抗。

本文利用风电场侧谐波阻抗可计算的特点, 从 PCC 谐波电压中分解出与回归方程系数无关的风电场侧谐波电流分量, 据此建立复线性回归方程。在计及风电场侧谐波阻抗的基础上计算风电场侧谐波发射水平; 针对风电场集电网络拓扑结构的多变性, 提出了一种集电网络聚合等值的方法, 通过将集电网络的混联结构聚合为 T 形网络结构计算风电场侧谐波阻抗, 并利用分散参数的误差边际效应对误差进行分析。仿真和实测数据证明了本文方法的有效性。

1 改进复线性回归方程的基本原理

谐波发射水平评估通常采用系统和风电场等值电路进行分析, 如图 1 所示。图中, U_{PCC} 和 I_{PCC} 分别为 PCC 谐波电压和电流; Z_s 和 Z_c 分别为系统侧和风电场侧谐波阻抗; I_c 为风电场侧谐波电流源; U_s 为系统背景谐波电压源。

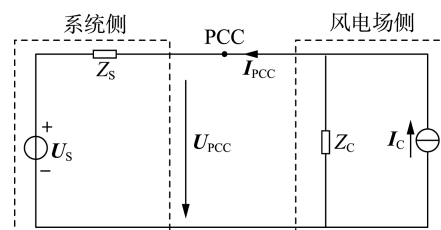


图 1 系统和风电场等值电路

Fig.1 Equivalent circuit of system and wind farm

由于风电场侧谐波阻抗 Z_c 可通过参数计算得到, 则风电场侧谐波电流为:

收稿日期: 2018-01-18; 修回日期: 2019-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477105)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477105)

$$I_C = U_{PCC}/Z_C + I_{PCC} \quad (1)$$

根据图 1 可知, PCC 谐波电压为:

$$U_{PCC} = \frac{Z_s Z_C}{Z_s + Z_C} I_C + \frac{Z_C}{Z_s + Z_C} U_s \quad (2)$$

由式(2)可见, PCC 谐波电压 U_{PCC} 是风电场侧谐波电流与系统背景谐波电压共同作用的结果, 且 I_C 、 U_s 与 Z_s 、 Z_C 互不相关。

风电场侧谐波阻抗 Z_C 主要由逆变器出口外的滤波器、变压器、线路和无功补偿电容器等元件决定, 系统侧谐波阻抗 Z_s 短时基本保持不变。假设系统侧背景谐波电压 U_s 是平稳随机的, 且满足:

$$U_s = E(U_s) + \varepsilon_s \quad (3)$$

其中, E 表示数学期望; ε_s 为复偏差。

因此, 可建立 PCC 谐波电压与风电场侧谐波电流之间的复线性回归方程如式(4)所示。

$$U_{PCC} = \beta_1 I_C + \beta_0 + \varepsilon \quad (4)$$

其中, U_{PCC} 为被解释变量; I_C 为解释变量; β_1 和 β_0 为回归系数; ε 为复数偏差项。根据线性回归原理, 解释变量与回归系数不应存在相关性。

$$\begin{cases} \beta_1 = Z_s Z_C / (Z_s + Z_C) \\ \beta_0 = E(U_s) Z_C / (Z_s + Z_C) \\ \varepsilon = \varepsilon_s Z_C / (Z_s + Z_C) \end{cases} \quad (5)$$

本文与文献[11]的不同之处在于, 本文采用风电场侧谐波源电流 I_C 代替 PCC 谐波电流 I_{PCC} 作为解释变量。这是因为考虑谐波阻抗 Z_C 的作用时, I_{PCC} 与 U_s 存在相关性, 这将影响回归系数的准确性, 而 I_C 与 U_s 不相关, 保证了回归方程的精度。

将 PCC 谐波电压和风电场侧谐波电流的 n 组测量数据表示为矩阵形式:

$$y = Ax + \varepsilon \quad (6)$$

$$y = [U_{PCC}(1) \ U_{PCC}(2) \ \cdots \ U_{PCC}(n)]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ I_C(1) & I_C(2) & \cdots & I_C(n) \end{bmatrix}^T$$

$$x = [\beta_0 \ \beta_1]^T, \ \varepsilon = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \cdots \ \varepsilon_n]^T$$

为使复数偏差 ε 的平方和达到最小, 即:

$$\min Q = \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|^2 \quad (7)$$

由复最小二乘法有^[11]:

$$x = (\bar{A}^T A)^{-1} \bar{A}^T y \quad (8)$$

其中, “ $\bar{\cdot}$ ”表示向量的共轭。

据此可得系统侧谐波阻抗 Z_s 为:

$$Z_s = \frac{Z_C \beta_1}{Z_C - \beta_1} \quad (9)$$

则风电场侧谐波电压发射水平和系统侧谐波电

压发射水平分别如式(10)、(11)所示。

$$U_{PCC-C} = \frac{Z_s Z_C}{Z_s + Z_C} \left(\frac{U_{PCC}}{Z_C} + I_{PCC} \right) \quad (10)$$

$$U_{PCC-S} = U_{PCC} - U_{PCC-C} \quad (11)$$

传统谐波发射水平计算方法^[5-11]基于 $|Z_C| \gg |Z_s|$ 的隐含假设, 将用户侧谐波电压发射水平简化为:

$$\hat{U}_{PCC-C} = \frac{Z_s Z_C}{Z_s + Z_C} I_C = Z_s I_{PCC} / \left(1 - \frac{Z_s I_s}{Z_C I_C} \right) \approx Z_s I_{PCC} \quad (12)$$

与式(12)所示的谐波发射水平计算方法忽略了用户侧谐波阻抗不同, 式(11)所示的谐波发射水平计算方法计及了风电场侧谐波阻抗的影响。

2 风电场侧谐波阻抗

以我国某实际风电场为例, 其由风机、箱变和线路组成的集电网络与无功补偿装置两部分构成, 如图 2 所示。

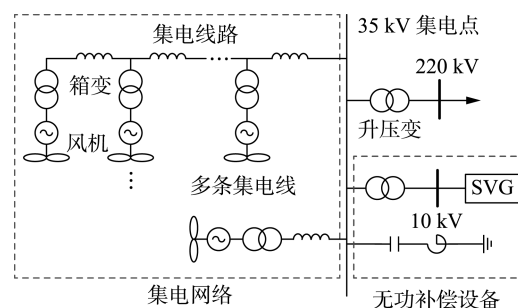


图 2 风电场拓扑结构

Fig.2 Topology of wind farm

当并网点位于风电场集电点时, 风电场侧谐波阻抗为集电网络与无功补偿设备的并联总阻抗。

2.1 永磁直驱型风机的谐波阻抗模型

永磁直驱型风机采用全功率变流器, 其由机侧变流器、网侧变流器和 LCL 滤波器构成。由于机侧变流器和网侧变流器被直流电容隔开, 风机的谐波特性仅由网侧 LCL 型逆变器决定。逆变器采用脉冲宽度调制 (PWM) 将产生谐波, 若直流侧电压平稳, 对网侧逆变器出口而言, 可等效为一谐波电压源^[12]。本文采用如图 3 所示的逆变器等效谐波电压源和滤波器表示风机的谐波模型。图中, U_h 为谐波电压源; L_{inv} 为逆变器侧电感; L_g 为滤波电感; C_f 为滤波电容; R_h 为谐波电阻; $Z_w(s)$ 为网侧阻抗。

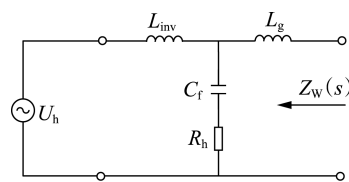


图 3 永磁直驱型风机的谐波模型

Fig.3 Harmonic model of PMSG-based wind turbine

为阻尼电阻; L_g 为网侧电感, 实际工程中常由箱变短路阻抗构成。

由 LCL 滤波器参数得到风机的谐波阻抗 $Z_W(s)$ 为:

$$Z_W(s) = sL_g + \frac{s^2 R_h C_f L_{inv} + sL_{inv}}{s^2 L_{inv} C_f + sR_h C_f + 1} \quad (13)$$

2.2 静止无功发生器的谐波阻抗模型

静止无功发生器(SVG)通过逆变器输出无功电流, 为抑制 SVG 逆变器产生的谐波, 实际工程中通常采用 SVG 连接变压器的短路阻抗作为 L 型滤波电感。则 SVG 的谐波阻抗模型为由逆变器等效谐波电压源与 SVG 连接变压器短路阻抗组成的串联模型, 其谐波阻抗 $Z_{SVG}(s)$ 为:

$$Z_{SVG}(s) = sL_T + R_T \quad (14)$$

其中, L_T 、 R_T 分别为变压器的等值电感和等值电阻。

3 风电场侧谐波阻抗的近似计算

假设: 风电场内风机、滤波器和箱变的参数相同, 但其到并网点的集电网络的拓扑结构各不相同, 分析集电网络阻抗的简化计算方法。

3.1 集电网络聚合等值方法

集电网络的拓扑结构多变, 但同型号风机的 LCL 滤波器的参数一致, 仅每台风机至集电点的线路长度存在分散性。设单条集电线连接 n 台同型号风机, 其等值电路如图 4 所示。图中, Z_1 、 Z_2 、 $\dots$ 、 Z_n 为相邻风机间线路的阻抗, 其总和为线路全长的阻抗 Z_L 。

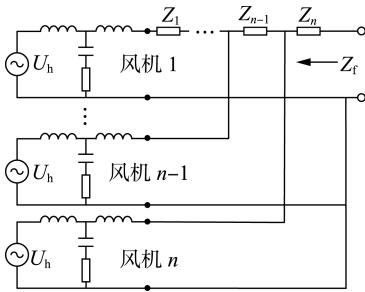


图4 集电线的等值电路

Fig.4 Equivalent circuit of single feeder

集电线阻抗由风机阻抗与线路阻抗混联而成, 考虑到单台风机阻抗 Z_W 远大于线路阻抗 Z_L , 将单条集电线的阻抗 Z_f 简化为:

$$\begin{cases} Z_f = Z_W/n \\ Z_{WP} = Z_W + Z_{CNT} \end{cases} \quad (15)$$

其中, Z_{WP} 为风机到集电点的等值谐波阻抗; Z_W 为单台风机阻抗; Z_{CNT} 为线路连接阻抗。

$$Z_{CNT} \approx \sum_{i=1}^n iZ_i = nZ_L - \sum_{i=1}^n (n-i)Z_i \quad (16)$$

由式(16)可知, 当 $Z_1 = Z_2 = \dots = Z_{n-1} = 0$ 、 $Z_n = Z_L$, 即风机都布置在集电线末端时, Z_{CNT} 取得最大值为 nZ_L ; 当 $Z_1 = Z_L$ 、 $Z_2 = Z_3 = \dots = Z_n = 0$, 即仅 1 台风机布置在线路末端、其他风机布置在集电线首端时, Z_{CNT} 取得最小值为 Z_L 。由此可得 Z_{CNT} 的范围边界为:

$$Z_L \leq Z_{CNT} \leq nZ_L \quad (17)$$

集电网络由多条集电线并联组成。设集电网络风机总数量为 N 、集电线总条数为 L , 第 i ($i=1, 2, \dots, L$) 条集电线连接 n_i 台风机, 则集电网络阻抗 Z_F 为:

$$Z_F = 1 / \sum_{i=1}^L \frac{n_i}{Z_W + Z_{CNT_i}} \quad (18)$$

其中, Z_{CNT_i} 为第 i 条集电线的线路连接阻抗。

式(18)中, 集电网络被表示为 N 个风电单元的并联, 每个风电单元均由风机阻抗和线路连接阻抗串联组成。由于线路阻抗小于箱变等值阻抗, 且不同风电单元仅在线路阻抗部分存在差异, 所以将风电场网络聚合为 1 台等值滤波器和等值线路所构成的 T 形结构等值电路是可行的, 如图 5 所示。图中, Z_{CNT_F} 为聚合后的线路连接阻抗。

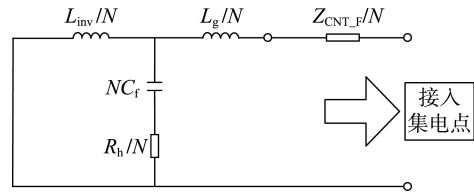


图5 集电网络聚合等值电路

Fig.5 Aggregated equivalent circuit of feeder network

将集电网络聚合后的谐波阻抗表示为:

$$Z_F = (Z_W + Z_{CNT_F}) / N \quad (19)$$

由于集电网络聚合前、后谐波阻抗保持不变, 则有:

$$Z_{CNT_F} \approx \sum_{i=1}^L (n_i Z_{CNT_i}) / N \quad (20)$$

由式(17)和(20)可得 Z_{CNT_F} 的范围边界为:

$$Z_{Lmin} \leq Z_{CNT_F} \leq n_{max} Z_{Lmax} \quad (21)$$

其中, Z_{Lmin} 和 Z_{Lmax} 分别为最短和最长集电线路的阻抗; n_{max} 为单条集电线所连接风机数量的最大值。

为减小集电网络阻抗近似值与真实值的差距, 将 Z_{CNT_F} 近似为其最大值与最小值的平均值, 如式(22)所示。

$$Z_{CNT_{JS}} = \frac{Z_{Lmin} + n_{max} Z_{Lmax}}{2} \quad (22)$$

故风电场集电网络近似阻抗 $Z_{F_{JS}}$ 为:

$$Z_{F_{JS}} = (Z_W + Z_{CNT_{JS}}) / N \quad (23)$$

若某台风机因故障等原因而退出运行, 仅需改

变风机总数量 N 即可。

3.2 集电网络谐波阻抗的近似计算误差

以我国某实际风电场为例,其包含 5 条集电线,每条集电线连接 10 台风机,集电线的长度分别为 4.7、8.0、11.2、13.5、15.5 km,集电线路的工频阻抗为 $0.12 + j0.32 \Omega/\text{km}$ 。风机及滤波器的参数如表 1 所示。

表 1 风机及滤波器参数

Table 1 Parameters of wind turbine and filter

参数	参数值	参数	参数值
额定功率 P/MW	2.0	箱变短路阻抗/%	6
额定电压 U_g/kV	0.69	逆变器侧电感 L_{inv}/mH	0.18
箱变容量 $S_T/(\text{MV}\cdot\text{A})$	2.2	滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	700
箱变额定电压/kV	0.69/37	滤波电阻 R_h/Ω	0.1

考虑集电网络拓扑可能的极端状况为:风机采用末端或首端布置方式,线路长度取最短或最长。集电网络主要次数谐波阻抗近似值的幅值误差如附录中的表 A1 所示。由表可见,集电网络谐波阻抗近似值的幅值误差最大值仅为 -16.1%。

3.3 风电场侧谐波阻抗的近似值及误差

风电场的其他参数如表 2 所示。

表 2 风电场参数

Table 2 Parameters of wind farm

参数类别	参数说明
短路容量	PCC(35 kV) 最小短路容量为 $760 \text{ MV}\cdot\text{A}$
FC 参数	额定容量为 12 Mvar, 串抗率为 6%, 品质因数为 100
SVG 连接变压器	额定容量为 $10 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 额定电压为 $(37 \pm 2 \times 2.5\%) \text{ kV}/10 \text{ kV}$, 短路阻抗百分比为 10%

集电网络详细线路拓扑结构如附录中的表 A2 所示,将由其计算所得风电场侧谐波阻抗作为参考值。当并网节点位于集电点时,风电场主要次数谐波阻抗的最小值、最大值、参考值和近似值分别如表 3 所示。

表 3 风电场侧谐波阻抗的边界值

Table 3 Harmonic impedance boundary value of wind farm

谐波次数	风电场侧谐波阻抗/ Ω			
	最小值	最大值	参考值	近似值
5	$7.8 \angle 88^\circ$	$8.1 \angle 88^\circ$	$7.9 \angle 88^\circ$	$7.9 \angle 88^\circ$
7	$20.1 \angle 86^\circ$	$20.8 \angle 86^\circ$	$20.3 \angle 86^\circ$	$20.4 \angle 86^\circ$
11	$64.4 \angle 17^\circ$	$79.6 \angle 19^\circ$	$74.9 \angle 18^\circ$	$74.2 \angle 18^\circ$
13	$26.3 \angle -14^\circ$	$40.9 \angle -30^\circ$	$35.7 \angle -25^\circ$	$34.9 \angle -25^\circ$

风电场侧谐波阻抗近似值的幅值相对误差 ε_R 为:

$$\varepsilon_R = \frac{|\text{近似值}| - |\text{边界值}|}{|\text{边界值}|} \times 100\% \quad (24)$$

最大幅值误差为近似值离最大、最小边界值误差 ε_R 的较大值,是风电场侧谐波阻抗近似值的误差边界值。由表 3 可得,风电场侧 5、7、11、13 次谐波

阻抗近似值的最大幅值误差分别为 4%、2%、16% 和 33%。

PCC 的短路容量计算系统侧的 5、7、11、13 次谐波阻抗参考值幅值分别为 9、13、20、23 Ω ,可见风电场侧谐波阻抗并非远大于系统侧谐波阻抗。

3.4 考虑元件参数误差的风电场侧谐波阻抗边界值

实际运行中,元件实际参数与额定参数之间存在误差,一般认为滤波电感和滤波电容器的容量存在最大 $\pm 5\%$ 的误差^[13],箱变短路阻抗存在最大 $\pm 10\%$ 的误差^[14]。LCL 滤波器的 L_{inv} 与 C_f 容量和箱变的短路阻抗可能同时存在多种方向的变化,经分析比较可知,当 L_{inv} 、 C_f 、 L_g 的容量都增大时,风机的 5、7 次谐波阻抗幅值增大,11、13 次的谐波阻抗幅值减小,反之亦然。当滤波器参数误差最大时,风机阻抗边界值如图 6 所示。

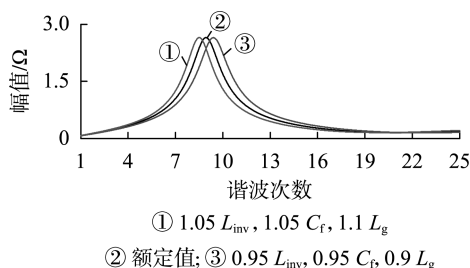


图 6 风机谐波阻抗的幅值

Fig.6 Amplitude of wind turbine harmonic impedance

为避免滤波器与电网发生谐振,常根据偏谐振原理,将调谐点设计在非整数次谐波的频率上^[15]。由图 6 可见,当滤波器的参数存在误差时,滤波器阻抗的实际谐振点在 430~471 Hz 之间,避开了主要次数的 5、7、11、13 次谐波。因此,滤波器参数的误差不会导致风机阻抗性质的改变,多台风机阻抗之间不会存在感性和容性阻抗相互抵消的情况,当各台风机阻抗均取边界值时,即可得到集电网络阻抗的边界值。

当同时考虑元件参数误差和集电网络近似误差时,集电网络谐波阻抗近似值的幅值误差边界如附录中的表 A3 所示,风电场侧谐波阻抗边界值如表 4 所示。由表 4 可知,风电场侧 5、7、11、13 次谐波阻抗近似值的最大幅值误差分别为 5%、7%、40% 和 72%。

表 4 考虑元件参数误差的风电场侧谐波阻抗边界值

Table 4 Harmonic impedance boundary value of wind farm considering parameter errors

谐波次数	风电场侧谐波阻抗/ Ω			
	最小值	最大值	参考值	近似值
5	$7.6 \angle 88^\circ$	$8.3 \angle 88^\circ$	$7.9 \angle 88^\circ$	$7.9 \angle 88^\circ$
7	$19.0 \angle 86^\circ$	$21.8 \angle 85^\circ$	$20.3 \angle 86^\circ$	$20.4 \angle 86^\circ$
11	$52.7 \angle 3^\circ$	$78.9 \angle 37^\circ$	$74.9 \angle 18^\circ$	$74.2 \angle 18^\circ$
13	$20.2 \angle -10^\circ$	$52.9 \angle -24^\circ$	$35.7 \angle -25^\circ$	$34.9 \angle -25^\circ$

4 仿真分析及实测数据分析

4.1 风电场谐波电压发射值的仿真分析

使用 MATLAB7.1 搭建诺顿等效电路仿真模型。为使仿真分析与实际情况相切合,结合实测数据波动的特点,设置仿真参数为: I_C 的幅值为 150 A,叠加 $\pm 20\%$ 随机波动和 5% 正弦波动; I_S 的幅值为 I_C 的幅值的 1/2,叠加 $\pm 10\%$ 随机波动和 5% 正弦波动; I_C 和 I_S 的初始相位角分别为 30° 和 60° ,均叠加 $\pm 10\%$ 随机波动和 10% 正弦波动; Z_S 的幅值参照其粗略计算值,角度为 70° ,幅值和相角分别设置 20% 和 10% 的正弦波动; Z_C 分别设置为表 3、4 中的最小值、最大值与参考值。仿真 1 440 个数据,以 60 个数据为 1 个数据段,分别采用本文方法和文献[11]的方法,估计系统侧谐波阻抗和风电场侧谐波电压发射值。仿真分析的重点在于比较计及风电场侧阻抗影响的本文方法与忽略风电场侧阻抗的文献[11]方法。

当仅考虑集电网络近似误差时,系统侧谐波阻抗和风电场谐波电压发射值的误差分别如表 5、6 所示。同时考虑元件参数误差和集电网络近似误差,系统侧谐波阻抗和风电场谐波电压发射值的误差分别如表 7、8 所示。由表 5—8 可见,对于同一次谐波,无论风电场侧谐波阻抗为边界值或参考值,本文方法计算出的系统侧谐波阻抗与风电场侧谐波发射值误差都更小。由于风电场的实际阻抗应位于最大和最小边界值的范围之内,故采用本文方法的计算误差应更小。

4.2 实测数据分析

实测谐波电压电流数据来自某 50 MW 风电场 35 kV 并网 1 d 每分钟 1 组的测量数据。测量时段内风电场因风速低于风机切入风速而停机脱网 1.5 h,随着风电场运行方式的变化,风电场并网点的

表 5 系统侧谐波阻抗的幅值误差

Table 5 Errors of harmonic impedance amplitude

谐波次数	相对误差的均方根值/%					
	文献[11]方法			本文方法		
	最小 Z_C	最大 Z_C	参考 Z_C	最小 Z_C	最大 Z_C	参考 Z_C
5	10.2	10.5	9.0	5.1	5.3	4.1
7	8.9	9.2	8.7	5.4	5.3	3.5
11	7.8	5.6	7.2	4.6	3.6	3.2
13	8.6	9.0	7.5	4.4	4.5	3.8

表 6 风电场谐波电压发射值的幅值误差

Table 6 Errors of harmonic voltage emission value of wind farm

谐波次数	相对误差的均方根值/%					
	文献[11]方法			本文方法		
	最小 Z_C	最大 Z_C	参考 Z_C	最小 Z_C	最大 Z_C	参考 Z_C
5	52.2	49.8	50.9	3.1	3.5	3.4
7	30.8	28.1	27.8	3.2	2.8	3.0
11	5.6	5.2	4.8	3.6	3.9	3.2
13	28.2	29.1	30.4	10.8	5.4	4.6

表 7 系统侧谐波阻抗的幅值误差

Table 7 Errors of utility harmonic impedance amplitude

谐波次数	相对误差的均方根值/%					
	文献[11]方法			本文方法		
	最小 Z_C	最大 Z_C	参考 Z_C	最小 Z_C	最大 Z_C	参考 Z_C
5	8.9	11.3	9.0	4.8	5.9	4.1
7	8.0	8.9	8.7	5.3	6.1	3.5
11	7.5	10.3	7.2	4.3	6.0	3.2
13	8.0	6.8	7.5	5.0	4.3	3.8

表 8 风电场谐波电压发射值的幅值误差

Table 8 Errors of harmonic voltage emission value of wind farm

谐波次数	相对误差的均方根值/%					
	文献[11]方法			本文方法		
	最小 Z_C	最大 Z_C	参考 Z_C	最小 Z_C	最大 Z_C	参考 Z_C
5	52.1	48.2	50.5	3.6	3.5	3.0
7	30.6	25.0	29.1	2.2	5.7	6.7
11	5.3	7.2	4.6	3.2	5.8	3.3
13	28.2	26.6	29.8	17.4	4.7	4.3

总谐波电压畸变率的平均值为 1.8%,最高值为 3.5% (超过国家标准),其中部分 5 次谐波电压和电流如图 7 所示,以 60 min 为数据段,采用本文方法与文献[11]方法计算系统谐波阻抗,结果如图 8 所示。

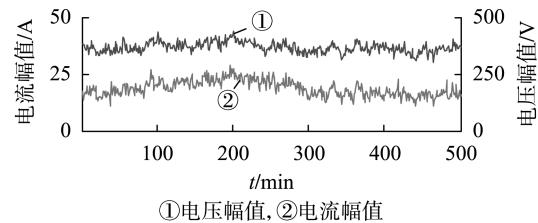


图 7 PCC 处 5 次谐波电压、电流幅值

Fig.7 5th-order harmonic voltage and current amplitudes of PCC

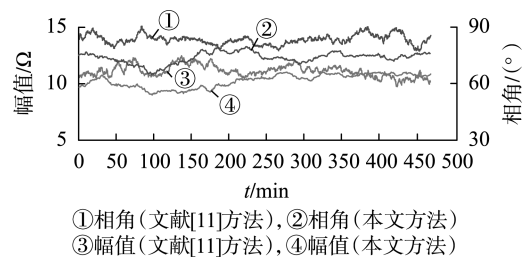


图 8 系统侧谐波阻抗估计值

Fig.8 Estimated values of 5th-order utility harmonic impedance

由 PCC 短路容量计算得到 Z_S 参考值约为 9Ω ,近似认为当风场内风机均脱网时所测得的 PCC 谐波电压为背景谐波电压,其 95% 概率值为 156 V,结合 Z_C 与 Z_S 的参考值计算出系统侧谐波发射水平参考值约为 72 V。系统侧谐波阻抗估计值(平均值)与风电场侧及系统侧的谐波电压发射值(95% 概率值)所得估计结果及误差如表 9 所示。

可见,相比文献[11]的方法,本文方法所得系统侧谐波阻抗值误差更小,所得风电场侧与系统侧谐波电压发射值更为准确合理。

表9 2种方法的误差比较

Table 9 Comparison of errors between two methods

参数	参考值	文献[11]方法		本文方法	
		估计值	误差/%	估计值	误差/%
Z_s/Ω	9.0	12.1	34	9.7	7
U_{PCC-S}/V	72	174	141.6	79	9.7
U_{PCC-C}/V	—	231	—	308	—

注: U_{PCC-S} 和 U_{PCC-C} 分别为 U_{PCC-S} 和 U_{PCC-C} 的幅值。

由PCC谐波电压、电流,结合 Z_C 、 Z_s 的参考值,可计算出 U_s 与 I_C ,据此,可分析文献[11]方法与本文方法的回归方程中,解释变量与回归系数的相关性对回归结果的影响。文献[11]方法中, I_{PCC} 与 U_s 的实、虚部相关系数的平均值分别为0.18与0.21,相关性较大,影响回归结果的准确性,所计算的 Z_s 的误差较大。本文方法采用 I_C 代替 I_{PCC} 作为解释变量,而 I_C 与 U_s 的实、虚部相关系数平均值分别仅为0.03与0.02,相关性较小,避免了回归方程中解释变量与回归系数的相关性对回归结果的干扰,故本文方法所计算的 Z_s 误差较小。

本文方法计及风电场侧谐波阻抗影响,所得谐波发射水平值与忽略风电场侧谐波阻抗的原方法计算结果差距较大,这是由文献[11]方法忽略 Z_C 对 I_C 的分流作用导致的。由于不能直接认定风电场PCC谐波电压均由风电场的谐波源产生,在评估谐波发射水平时,忽略风电场侧谐波阻抗,可能导致错误地判断和治理主要谐波污染责任方。

对于风电场并网而言,接入更高电压等级可减少风电场谐波对系统侧的影响,原因在于电压等级更高,短路容量更大,系统侧阻抗更小,同等谐波电流所造成的并网点谐波电压更小。此外,由于风电场侧谐波阻抗并非远大于系统侧谐波阻抗,当背景谐波较大时,不能忽略风电场侧谐波阻抗对风电场侧谐波电流源的分流作用,认为风电场并网点的谐波电流主要由风电场侧谐波电流源导致。

5 结论

a. 本文利用风电场侧谐波阻抗可计算的特点,建立改进复线性回归模型,采用复最小二乘法计算系统侧谐波阻抗,仿真分析和实测数据验证了改进效果。

b. 针对集电网络拓扑结构的多变性,提出集电网络聚合等值方法,并将其阻抗边界值的平均值作为集电网络的近似阻抗,减少了对集电网络详细拓扑结构信息的要求,适用于工程实际。

c. 本文在风电场风机、滤波器参数基本一致的基础上寻求风电场等值谐波阻抗计算方法。当风电场风机、滤波器参数不一致时,探索在工程测量中方便易行的风电场侧谐波阻抗计算方法,尚需进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 赵勇,沈红,李建华,等. 谐波源的识别及其与非谐波源的分离方法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(5):84-87.
ZHAO Yong, SHEN Hong, LI Jianhua, et al. Approach of identification and separation of harmonic sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 84-87.
- [2] 杨洪耕,王磊. 基于拉盖尔多项式的非线性负荷谐波发射水平估计[J]. 中国电机工程学报,2005,25(7):81-85.
YANG Honggeng, WANG Lei. Assessing harmonic emission levels from non-loads using Laguerre polynomials[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 81-85.
- [3] XU W, LIU Y. A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.
- [4] PFAJFAR T, BLAZIC B, PAPIC I. Harmonic contributions evaluation with the harmonic current vector method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 23(1): 425-433.
- [5] YANG H, PIROTTÉ P, ROBERT A. Harmonic emission levels of industrial loads statistical assessment[C] // CIGRE Proceedings. Paris, France: [s.n.], 1996: 1-7.
- [6] 张巍,杨洪耕. 基于二元线性回归的谐波发射水平估计方法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6):50-53.
ZHANG Wei, YANG Honggeng. A method for assessing harmonic emission level based on binary linear regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 50-53.
- [7] 解绍锋. 基于秩次回归的系统谐波阻抗分析与谐波评估方法[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):29-33.
XIE Shaofeng. Harmonic impedance analysis and harmonic assessment based on rank regression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 29-33.
- [8] HUI J, YANG H G, LIN S F, et al. Assessing utility harmonic impedance based on the covariance characteristic of random vectors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1778-1786.
- [9] 华回春,贾秀芳,曹东升,等. 系统谐波阻抗估计的极大似然估计方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(10):1692-1699.
HUA Huichun, JIA Xiufang, CAO Dongsheng, et al. A maximum likelihood method for harmonic impedance estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1692-1699.
- [10] ZHAO X, YANG H. A new method to calculate the utility harmonic impedance based on fastICA[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 381-388.
- [11] 贾秀芳,华回春,曹东升,等. 基于复线性最小二乘法的谐波责任定量划分[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):149-155.
JIA Xiufang, HUA Huichun, CAO Dongsheng, et al. Determining harmonic contributions based on complex least squares method[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 149-155.
- [12] LIU Z, RONG J, ZHAO G, et al. Harmonic assessment for wind parks based on sensitivity analysis[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1373-1382.
- [13] 许津铭,季林,葛小伟,等. 计及逆变器侧电流反馈影响的LCL滤波器参数优化设计[J]. 中国电机工程学报,2016,36(17):4656-4664.
XU Mingjin, JI Lin, GE Xiaowei, et al. LCL-filter optimization design with consideration of inverter-side current feedback control impacts[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4656-4664.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准

管理委员会. 电力变压器 第1部分:总则:GB/T 1094.1—2013 [S]. 北京:中国标准出版社,2013.

[15] WAKILEH G J. 电力系统谐波:基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政,译. 北京:机械工业出版社,2011:87-88.

作者简介:

谭 鹏(1992—),男,四川广安人,硕士研究生,研究方向为新能源并网及电能质量(E-mail:tanpengsc@gmail.com);
杨洪耕(1949—),男,四川成都人,教授,博士研究生导



谭 鹏

师,博士,主要研究方向为电能质量无功电压控制等;

马晓阳(1991—),男,河南南阳人,博士研究生,主要研究方向为新能源并网;

徐方维(1978—),女,四川成都人,讲师,博士研究生,通信作者,主要研究方向为电能质量分析(E-mail: xufangwei@scu.edu.com)。

Assessment of harmonic emission level considering influence of harmonic impedance of wind farm

TAN Peng, YANG Honggeng, MA Xiaoyang, XU Fangwei

(College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Wind turbine filter and reactive power compensation device lead to the result that the harmonic impedance of wind farm is not much larger than that of the utility, so the influence of harmonic impedance of wind farm should not be neglected when calculating harmonic emission value of wind farm. A method based on the improved complex linear regression equation is proposed for assessing the harmonic emission value of wind farm. The harmonic current components of wind farm side, which are not related with the regression equation coefficients, are separated from the harmonic voltage of PCC (Point of Common Coupling). Accordingly, a complex linear regression equation is established. The utility harmonic impedance is calculated by complex least square method. Considering the harmonic impedance of wind farm, the harmonic emission value is calculated. For the topology variability of wind farm feeder network, an equivalent and aggregation method for feeder network is proposed, by which, the hybrid feeder network is aggregated into T-shaped network to calculate the harmonic impedance of wind farm. The error marginal effect of dispersion parameters is used to analyze error. Simulation and measured data verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: wind power; complex linear regression; harmonic impedance of wind farm side; aggregated equivalent; harmonic emission level

(上接第166页 continued from page 166)

作者简介:

崔 勇(1978—),男,河南兰考人,工程师,博士,研究方向为能源技术经济、电力市场以及智能电网技术等(E-mail: cuiyong826@126.com);

李 鹏(1985—),男,河南开封人,工程师,博士,通信作者,研究方向为智能配电网、风险管理;

姬德森(1987—),男,贵州凯里人,副高级工程师,研究



崔 勇

方向为计量技术与电力市场。

Joint operation strategy of wind power-photovoltaic-pumped storage hydro energy based on multilateral income

CUI Yong¹, LI Peng², JI Desen³, DU Zhongjian⁴

(1. School of Economics and Management, Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

3. State Grid Jiangxi Electric Power Metering Center, Nanchang 330096, China;

4. State Grid Jiangxi Electric Power Dispatch Control Center, Nanchang 330000, China)

Abstract: Comprehensive income will become an important target for the operation of each market subject in the future market competition environment of new energy. On the basis of multiple energy coordinated operation, power generation cost, feed-in tariff and auxiliary service income, a multi-objective function including cost of wind power, photovoltaic and pumped storage power station is constructed, which considers the voltage deviation and frequency stability. Taking a typical daily load curve of a certain region as an example, the simulation of IEEE 57-bus system is carried out in MATLAB to calculate the auxiliary service income and normalized stability index of multi-energy complementary, which verifies the effectiveness of the proposed strategy.

Key words: market environment; multi-energy complementary; power grid scheduling; optimization strategy

表 A1 集电网络谐波阻抗近似值的幅值误差

Table A1 Amplitude errors of harmonic impedance approximation of feeder network

谐波次数	相对误差/%			
	首端布置		末端布置	
	线路最长	线路最短	线路最长	线路最短
5	-4.1	-5.1	10.0	-0.5
7	-2.6	-3.2	6.2	-0.4
11	3.1	3.8	-6.9	0.5
13	7.8	10.2	-16.1	1.1

表 A2 集电网络详细线路拓扑结构

TableA2 Detailed line topology of feeder network

线路编号	相邻风机间线路的长度/km									
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
馈线 I	1.1	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.9	0.3	0.4	0.6
馈线 II	2.5	0.9	0.8	0.6	0.4	0.8	0.6	0.4	0.3	0.8
馈线 III	3.6	0.8	0.5	1.5	0.6	0.8	1.5	0.6	0.9	0.3
馈线 IV	4.6	0.5	0.4	1.6	0.6	0.5	1.2	0.3	0.5	1.3
馈线 V	5.2	0.8	1.7	0.4	0.9	1.6	0.8	0.6	1.7	0.5

注：线路编号 0-1 表示第 1 台风机离集电点的线路长度，线路编号 1-2 表示第 1 台风机与第 2 台风机间的线路长度，依此类推。

表 A3 集电网络谐波阻抗近似值的幅值误差边际

TableA3 Amplitude boundary error of harmonic impedance approximation of feeder network

谐波次数	相对误差/%	
	最小边界阻抗	最大边界阻抗
5	-13.6	19.2
7	-17.9	25.1
11	-28.0	34.2
13	-32.0	33.9

注：相对误差表示集电网络谐波阻抗近似值距离最小边界阻抗和最大边界阻抗的幅值相对误差。