

基于 VC-综合赋权法的海上风电 APF 配置优化方法研究

盛四清, 鲍彦文

(华北电力大学 电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 大容量海上风电机组的接入改变了传统电力系统结构, 给电网带来了谐波等问题, 影响了电能质量。为抑制海上风电机组产生的低次谐波, 文章首先建立了海上风电机组并网电流的低次谐波理论模型; 然后, 在仿真软件 ETAP 上搭建海上风电机组仿真模型, 验证不同出力情况下风电场的输出谐波特性; 最后, 基于风电场输出谐波特性, 提出变异系数 (Variation Coefficient, VC) 综合赋权法对风电场有源滤波器 (APF) 进行优化配置, 提升了风电场谐波的治理效果。基于实际算例验证了所提方法的有效性。

关键词: 海上风电机组; 低次谐波; VC-综合赋权法; 有源滤波器

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)03-0370-08

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”目标的提出, 海上风电凭借资源丰富、资源条件稳定、经济效益高等优势, 已成为研究热点^[1-3]。但随着风电装机容量和规模的增加, 风电并网产生的谐波给电网安全稳定运行带来了严重影响^[4,5]。

海上风电并网直接与公共电网相接, 并网的谐波问题会更加突出^[6-8]。文献[9]指出, 低次谐波是海上风电谐波治理的首要目标, 而网侧变流器是引起这些谐波的主要因素。文献[10]指出, 死区是引起网侧变流器谐波的主要原因, 考虑功率器件的死区效应后, 逆变器输出波形的低次谐波电压随着死区时间增加而增加, 低次谐波含量增加明显。目前针对因风机变流器死区产生的低次谐波电流的理论分析还需进一步研究。针对含多风机风电场的谐波特性分析, 文献[11]指出, 风电场谐波特性与风电机组类型、风电机组运行工况、运行风机台数等密切相关。考虑到风机运行状态不同时, 风电场谐波可能并不会随其线性变化, 目前已有学者对此进行了研究。文献[12]在 PSCAD/EMTDC 软件平台构建了双馈风机模型, 并通过实测数据与仿真结果进行对比, 分析在不同出力下的双馈型风机谐波特性。文献[13]基于 Matlab 搭建了含双馈风力发电的全系统仿真模型, 重点构

建了风速的四分量模型, 并针对不同风速和不同系统容量分析双馈风力发电系统并网的谐波特性。文献[14]考虑电网背景谐波、调制死区效应以及功率因数的影响, 建立了可准确反映直驱风电机组并网中频谐波电流的动态数学模型, 并在 Matlab 平台仿真验证了模型的准确性。然而, 上述文献主要针对单台风机进行仿真建模研究, 少有针对大规模风电项目接入评估的研究。在谐波特性分析的基础上, 为了降低风电场谐波对电网的影响, 装设 APF 是目前较为普遍的治理措施, 赋权算法可在考虑不同工况的风电场谐波污染情况下, 对 APF 进行优化配置。文献[15]采用层次分析法 (AHP) 进行电能质量评估, 但由于专家主观因素的不确定性, 造成了结果的差异性。文献[16]采用指标相关法 (CRITIC), 通过指标数据间的差异性和关联性确定电能质量各指标权重, 但客观赋权对数据质量依赖度高, 对比实际情况容易出现偏差。上述文献仅针对主客观赋权算法进行简单组合, 且没有采用 APF 配置问题的组合赋权算法进行验证分析。此外, 在组合方式、专家建议、客观数据上, 也没有针对 APF 配置问题进行深入研究。

本文将分析海上风电机组低次谐波产生原理, 并基于 ETAP 仿真平台, 针对不同功率出力情

收稿日期: 2023-03-07。

基金项目: 国网辽宁省电力有限公司揭榜挂帅项目 (2021YF-81); 2021 年辽宁省百千万人才工程资助项目 (省部级)。

作者简介: 盛四清 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统分析与控制方面的研究工作。E-mail: 15904176696@163.com

况对海上风电场直驱型风机的谐波开展仿真分析。提出 VC-综合赋权法对仿真数据进行处理,对比单一主客观赋权算法,能综合考虑专家建议和客观数据,从而得到有效治理谐波的 APF 的配置策略,为海上风电场低次谐波分析和治理提出新的研究方向。

1 风机低次谐波特性分析

目前,风电场主要采用双馈和直驱两种恒频变速风机类型^[17],这两种风机通过网侧变流器向电网输出恒定的功率。由文献[18-20]可知,风机低次谐波来源主要为网侧变流器的死区。网侧变流器的主电路如图 1 所示。

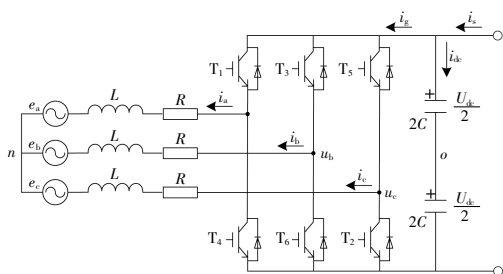


图 1 网侧变流器主电路

Fig.1 Main circuit diagram of grid side converter

由图 1 可知,网侧变流器由三相桥臂构成,通过控制器控制开关 T₁~T₆ 的开断,将直流电流 i_g 逆变为可控的三相交流电流 i_a, i_b, i_c,从而控制功率由直流母线向电网输送。开关过程不仅产生高频谐波,还因死区等原因产生低次谐波,本文将对网侧变流器产生低次谐波的机理进行分析。

1.1 网侧变流器低次谐波电压特性分析

为分析由死区引起的低次谐波特性,本文以网侧变流器中的一相为例进行分析,并将电源电压简化为±1,如图 2 所示。

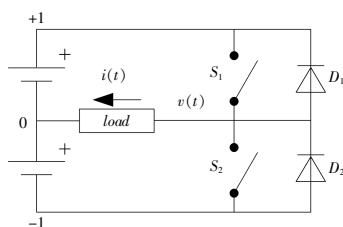


图 2 网侧变流器一相桥臂

Fig.2 One phase bridge arm diagram of grid side converter

在理想模型中,电源上下桥臂通过两个开关交替连接负载,但功率开关管存在显著的通断时间,为了避免上、下桥臂在开关瞬间直通发生短

路,所以必须设置死区时间。死区时间内,输出波形不受逻辑信号控制,且开关频率较高,会使低次谐波电压幅值增高^[21]。在不考虑死区的理想状态下,PWM 以参考信号 s(t)的自然采量为例,电压 v(t)波形如图 3 所示。

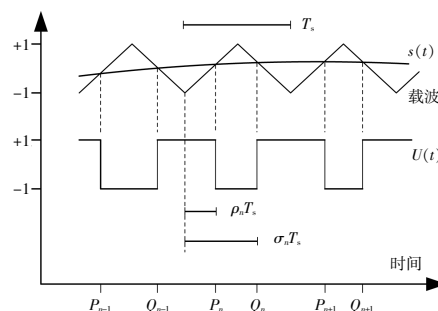


图 3 PWM 自然采样输出电压

Fig.3 PWM natural sampling output voltage diagram

实际中,在死区时间,输出电压取决于输出电流的极性。假设电流极性由阶跃函数表示为

$$\Phi(t) = \text{Sgn}[\cos(\omega t - \varphi)] = \begin{cases} +1, & -\frac{1}{2}\pi + \varphi < \omega t < \frac{1}{2}\pi + \varphi \\ -1, & \frac{1}{2}\pi + \varphi < \omega t < \frac{3}{2}\pi + \varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中:φ 为理想输出电压和输出电流的相位差,根据负载阻抗确定。

考虑死区时间的切换时间为

$$P_n = \left\{ n + \frac{1}{4} [1 + s(P_n)] \right\} T_s + \frac{1}{2} [\delta - \Phi(P_n)] T_d$$

$$Q_n = \left\{ n + \frac{1}{4} [3 - s(Q_n)] \right\} T_s + \frac{1}{2} [\delta + \Phi(Q_n)] T_d \quad (2)$$

式中:δ 为对称方式死区时间实现方式,δ=1 表示延迟导通方式,δ=0 表示对称方式。

根据式(2)可将考虑死区时间的切换时间转化为

$$P(\tau) = \left\{ \tau + \frac{1}{4} [1 + M \cos(\omega P(\tau))] \right\} T_s + \frac{1}{2} \{\delta - \Phi[P(\tau)]\} T_d \equiv [\tau + \rho(\tau)] T_s$$

$$Q(\tau) = \left\{ \tau + \frac{1}{4} [3 - M \cos(\omega Q(\tau))] \right\} T_s + \frac{1}{2} \{\delta + \Phi[Q(\tau)]\} T_d \equiv [\tau + \sigma(\tau)] T_s \quad (3)$$

根据式(3)可推出:

$$p(t) = \frac{1}{4} [1 + M \cos(\omega t)] + \frac{1}{2} [\delta - \Phi(t)] T_d / T_s$$

$$q(t) = \frac{1}{4} [3 - M \cos(\omega t)] + \frac{1}{2} [\delta + \Phi(t)] T_d / T_s \quad (4)$$

若输出电压被积函数非零, 则需满足:

$$\frac{t}{T_s} - q(t) < \tau < \frac{t}{T_s} - p(t) \quad (5)$$

结合式(4), (5)可推导出输出电压为

$$U(t) = 1 - 2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{t/T_s - q(t)}^{t/T_s - p(t)} e^{2\pi n i \tau} d\tau = 1 - 2 [q(t) - p(t)] - 2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} (2\pi n i)^{-1} e^{2\pi n i t / T_s} \{e^{-2\pi n i p(t)} - e^{-2\pi n i q(t)}\} = M \cos(\omega t) - \frac{2T_d}{T_s} \Phi(t) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} (\pi n i)^{-1} e^{2\pi n i t / T_s} e^{-n i \pi \delta T_d / T_s} \times \{i^n e^{i n \pi [(1/2) M \cos(\omega t) - \Phi(t) T_d / T_s]} - (-i)^n e^{i n \pi [(1/2) M \cos(\omega t) + \Phi(t) T_d / T_s]}\} \quad (6)$$

由式(6)可知, 网侧变流器的死区效应主要在低频奇次(5, 7, 11, 13次)引起部分谐波电压, 受电流控制器影响, 会引起低次谐波电流畸变。

1.2 网侧变流器低次谐波电流特性分析

在分析输出谐波电压的基础上, 为了计算变流器输出谐波的电流, 需建立变流器输出谐波电压与谐波电流间的关系, 对数字单环控制系统在数字域进行建模。与模拟域模型相比, 数字域模型能够更加贴切地分析输出低次谐波, 具体的数字域控制系统如图4所示。

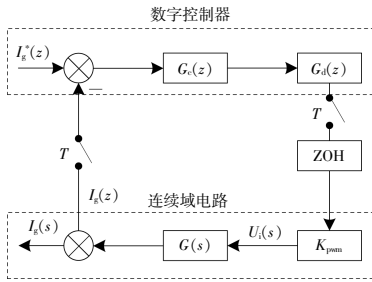


图4 数字单环控制系统框图

Fig.4 Block diagram of digital single loop control system

图中: $G_d(z)$ 为从采样时刻到 PWM 比较时刻的延时; $G_c(z)$ 为系统的数字控制器; ZOH 模块为 PWM 输出的等效零阶保持器。为保证电流内环对参考电流的精确跟踪, 采用两相静止坐标系下的准 PR 控制器作为系统的数字控制器 $G_c(z)$ 。

由图4可得风机输出电压 U_i 和输出电流 I_g 之间的关系, 从而得到风机输出电流中各次谐波含量为

$$I_g(j\omega_n) = U_i(j\omega_n) \frac{G(z)}{1 + G_{open}(z)} \Big|_{z=j\omega_n} \quad (n=5, 7, 11, 13) \quad (7)$$

式中: $I_g(j\omega_n)$ 为输出电流各次低频谐波的幅值; $U_i(j\omega_n)$ 为风机输出电压各次低频谐波的幅值; $G(z) = \frac{T_s}{L(z-1)}$ 为以电感作为风机输出滤波器; $G_{open}(z) = K_{pwm} G_d(z) G(z) G_c(z)$ 为控制系统离散域下的正向开环传递函数。

2 海上直驱风电场建模与谐波分析

ETAP 电力系统具有更多的功能模块和系统模型, 适用于多节点电力系统电磁仿真的应用环境^[22]。文献[23]在 ETAP 上进行谐波仿真分析后, 在另外两款仿真分析软件 EMTDC 和 PSASP 上进行了建模分析, 通过对照, 指出了 ETAP 在分析规模化电力系统电能质量问题的可行性、先进性^[24]。

2.1 直驱型风机建模

海上风电场大多是永磁直驱风力发电机组, 主要由风力发电机、机侧变流器和网侧变流器 3 部分组成, 如图5所示。

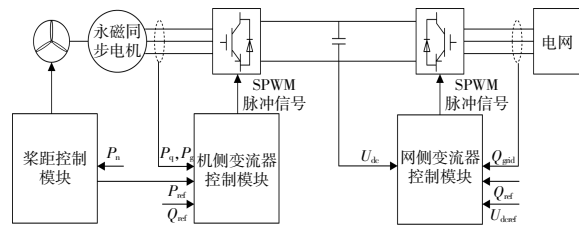


图5 直驱风电机组结构

Fig.5 Structure diagram of direct drive wind turbine

本文在 ETAP 平台进行直驱风机建模, 风机模型和变流器控制模型分别如图6, 7所示。

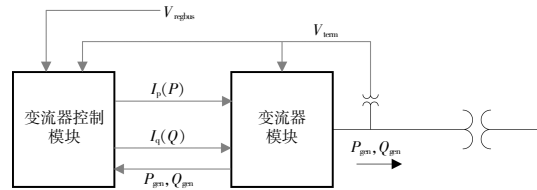


图6 风机模型结构图

Fig.6 Wind turbine model structure diagram

图中: $I_p(P)$ 为有功电流命令; $I_q(Q)$ 为无功电流命令; P_{gen} 为输出有功功率; Q_{gen} 为输出无功功率; V_{reghus} 为母线电压。

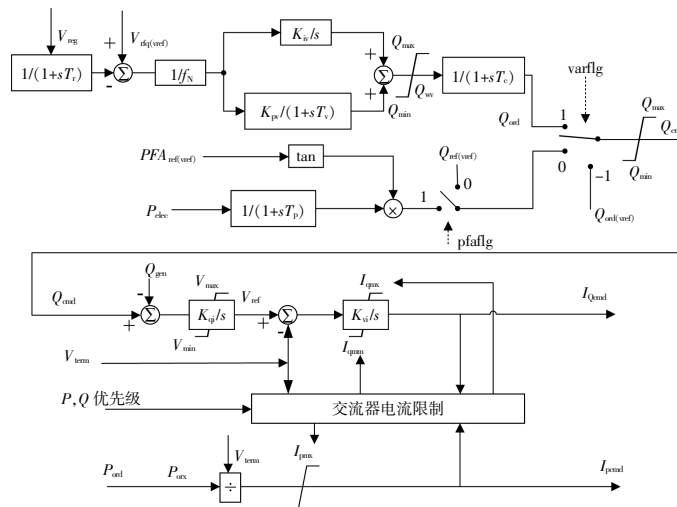


图 7 变流器控制模型

Fig.7 Converter electrical control model

图中： K_{iv} 为风控调节器积分增益； K_{pw} 为风控调节器比例增益； K_{qi} 为无功控制积分增益； K_{vi} 为电压控制积分增益； T_c 为风控输出和风机之间的时间常数； T_r 为风控电压测量时间常数； T_v 为风控仿真器比例路径中的时间常数； T_p 为控制功率测量中的时间常数。

借助 ETAP 平台的优势，该模型可对风速模型参数、桨距控制模型参数以及变流器控制模型参数等进行灵活修改，针对不同工况下的风机谐波特性进行快速仿真。

2.2 海上风电实际算例建模

本文选取的风电场为某海域实际风电场建设工程中的 I 场址，如图 8 所示。

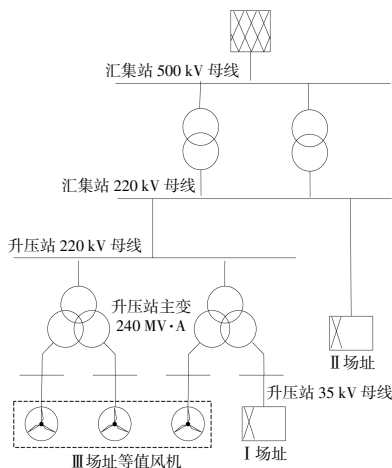


图 8 海上风电场结构

Fig.8 Structural drawing of offshore wind farm

工程规划装机容量为 98.8 MW，拟安装 19 台风力发电机组，风机相关参数：额定容量为 5.2

MW，额定电压为 690 V，额定频率为 50 Hz。风机箱变选用 5.75 MV·A 升压变压器，电压组合为 $(35 \pm 2) \times 2.5\% / 0.69$ kV。

本工程 98.8 MW 风电场建设 4 回线路，19 台风机共分为 4 组，其中 3 组每组 5 台风电机组组合成一个联合单元，1 组 4 台风电机组组合成一个联合单元，场内集电线路每回输送容量分别为 26 MW 和 20.8 MW。以 4 回 35 kV 海缆线路接入 III 场址项目已建成投运的 220 kV 海上升压变电站 35 kV 预留母线为间隔，升压站装设两台容量为 240 MV·A 的升压变压器，升压后与 III 场址共同经 2 回 220 kV 海缆线路登陆后接入海上风电场陆上集电中心，最后与 II 场址一同接入汇集站。

依据风电场和电网的参数及接线图，在 ETAP 中建立对应的电能质量评估模型，如图 9 所示。I 场址内部 19 台风力发电机组、对应的升压变压器及集电线路均根据实际工程设计接线图建立模型。已经投运的 II 场址与 III 场址内部根据母线将风机等设备等值为 3 组，使其输出功率与实测数据相符。

3 谐波优化治理措施研究

在理论分析了风机谐波特性后，可对加装 APF 的谐波污染治理措施进行优化。通过赋权算法，考虑风机不同出力下的谐波含量，可进一步对 APF 进行优化配置，以适应大多数时段风机产生的谐波。本文提出了基于 AHP 主观赋权法和 CRITIC 客观赋权的 VC-综合赋权法^[25]。AHP 主观赋权法将问题分解为不同的指标，根据指标之间

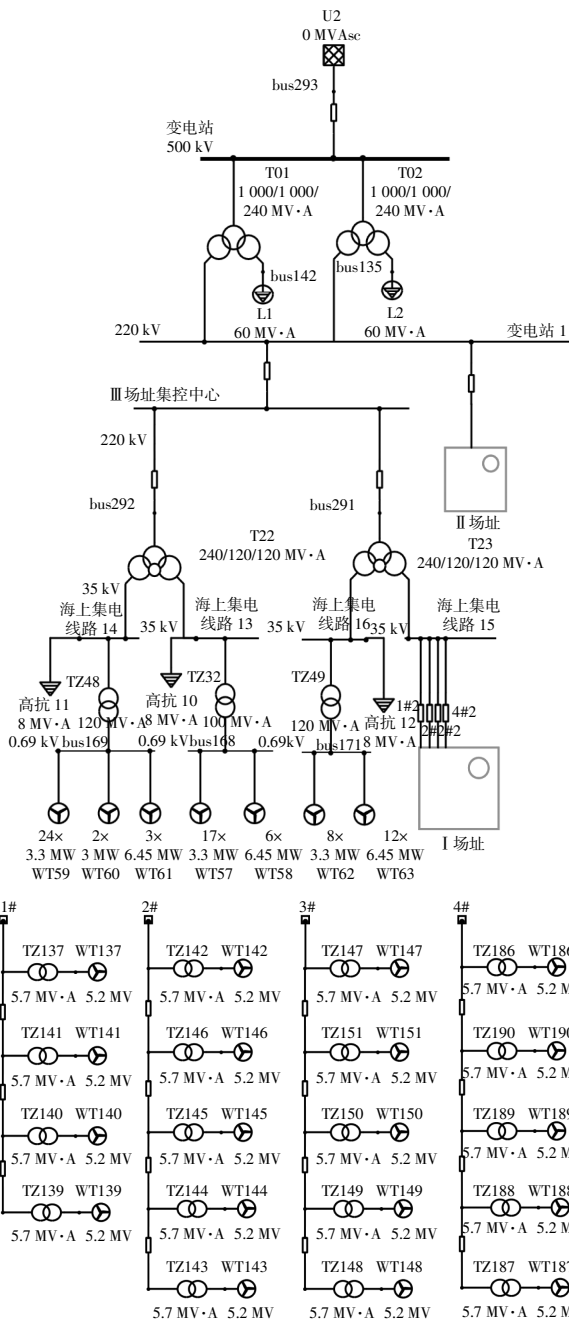


图9 风电场 ETAP 建模图

Fig.9 ETAP modeling diagram of wind farm

的关系以及人为经验构建判断矩阵 A ，通过层次结构模型计算不同指标的权重。CRITIC 客观赋权法根据所要赋权的指标数据包含信息量的多少确定权重，而信息量由指标数据之间的差异性和相互关联程度形成的相关系数矩阵 R 表示。本文提出的 VC-综合赋权法，通过变异系数法将主客观赋权算法结合起来，既能考虑不同指标的重要性，又能对已有数据进行定量分析，使结论更有说服力。

力。通过变异系数法确定综合赋权法中的比例系数 α, β ，首先建立综合赋权模型：

$$w = \alpha w' + \beta w'', \alpha, \beta \geq 0, \alpha + \beta = 1 \quad (8)$$

式中： w' 为 AHP 法求得主观权重； w'' 为 CRITIC 法求得客观权重。

构造目标函数为

$$\max J_f = \alpha \sum_{j=1}^n w' \times A_j + \beta \sum_{j=1}^n w'' \times R_j \quad (9)$$

针对此目标函数可采用拉格朗日极值算法进行求解，得到 α, β 分别为

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^n w' \cdot A_j}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^n w' \cdot A_j\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^n w'' \cdot R_j\right)^2}} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^n w'' \cdot R_j}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^n w' \cdot A_j\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^n w'' \cdot R_j\right)^2}} \quad (11)$$

式中： α^*, β^* 分别为 α, β 归一标准化后的结果。

根据式(11)可求得综合权重为

$$w = \alpha^* w' + \beta^* w'' \quad (12)$$

4 仿真及结果分析

4.1 不同出力谐波对比

根据风机谐波测试数据、线路参数以及电网系统侧的参数，本文建立了某海上风电场 I 的仿真模型。通过对不同出力条件下的风机谐波特性进行仿真，可得到不同工况下风电场注入汇集站的谐波电流仿真结果，如图 10 所示。

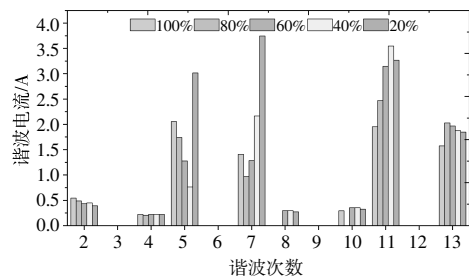


图10 风电场不同出力时注入汇集站谐波电流

Fig.10 Harmonic current diagram of injection collection station under different output of wind farm

同步得到不同工况下风电场注入汇集站的谐波电压仿真结果，如图 11 所示。

由以上仿真数据可以看出：5, 7, 11, 13 次谐波幅值较大，符合死区产生谐波的理论分析；谐波

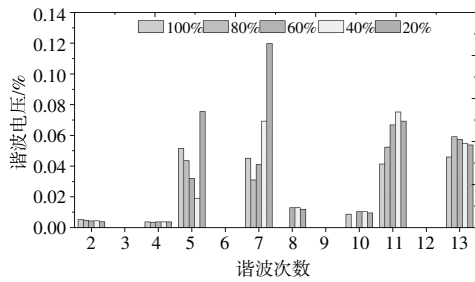


图 11 风电场不同出力时汇集站谐波电压

Fig.11 Harmonic voltage diagram of collection station under different output of wind farm

电流与谐波电压对应,符合电流闭环传递函数的

推导。接下来将针对 5,7,11,13 次谐波进行 APF 的优化配置计算。

4.2 APF 优化配置

根据专家意见得到不同工况谐波之间的相对重要性系数,判断矩阵 A 中元素 a_{ij} 第 i 属性和第 j 属性之间的相对重要性系数,按照此方式排列形成矩阵后进行归一化得到 AHP 主观赋权法的判断矩阵 A ,如式(13)所示。根据图 10 不同工况下的谐波电流数据,求得 CRITIC 客观赋权法的相关系数矩阵 R ,如式(14)所示。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.836\ 748 & 1.514\ 587 & 0.954\ 018 & 0.793\ 808 \\ 1.195\ 102 & 1 & 1.810\ 087 & 1.140\ 149 & 0.948\ 682 \\ 0.660\ 246 & 0.552\ 46 & 1 & 0.629\ 886 & 0.524\ 109 \\ 1.048\ 198 & 0.877\ 078 & 1.587\ 588 & 1 & 0.832\ 069 \\ 1.259\ 75 & 1.054\ 094 & 1.908\ 001 & 1.201\ 824 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.621\ 474 & 0.321\ 829 & 0-0.093\ 815 & 0.012\ 489 \\ 0.621\ 474 & 1 & 0.839\ 611 & 0.434\ 690 & -0.459\ 663 \\ 0.321\ 829 & 0.839\ 611 & 1 & 0.853\ 472 & -0.098\ 334 \\ -0.093\ 815 & 0.434\ 690 & 0.853\ 472 & 1 & 0.242\ 448 \\ 0.012\ 489 & -0.459\ 663 & -0.098\ 334 & 0.242\ 448 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据判断矩阵 A 和相关系数矩阵 R 计算 AHP 主观赋权法、CRITIC 客观赋权法的权重结果;然后由本文提出的变异系数法求得比例系数,得到 VC-综合赋权法的权重结果,如表 1 所示。

表 1 不同赋权算法权重结果
Table 1 Weight results of different weighting algorithms

算法	100%	80%	60%	40%	20%
AHP	0.193 7	0.231 5	0.127 9	0.203 0	0.244 0
CRITIC	0.231 4	0.167 6	0.152 5	0.164 0	0.284 5
VC-综合法	0.203 3	0.215 1	0.134 2	0.193 0	0.254 3

根据权重可计算出 APF 的 5,7,11,13 次谐波设定值,对比以单一工况配置 APF 的结果,如表 2 所示。

表 2 APF 5,7,11,13 次谐波设定值
Table 2 APF 5, 7, 11 and 13 harmonic setting values

方法	5	7	11	13
单一工况	2.054 8	1.409 3	1.952 1	1.573 0
VC-综合法	1.877 6	2.037 6	2.866 6	1.851 7

4.3 APF 仿真验证

根据计算出的 APF 定值,在 ETAP 平台模型中的汇集站加设 APF,在不同出力情况下进行仿真验证。对比以单一工况和 VC-综合赋权法配置的 APF,分别对风电场的谐波电流特性进行分析。

装设以单一工况配置的 APF 后,风电场汇集

站注入谐波电流特性如图 12 所示。

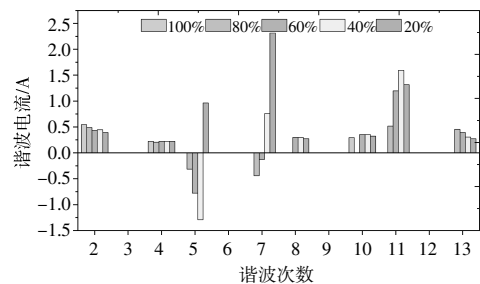


图 12 装设以单一工况配置的 APF 后风电场谐波电流

Fig.12 Harmonic current diagram of wind farm after installing APF with single working condition configuration

装设以 VC-综合赋权法配置的 APF 后,风电场汇集站注入谐波电流特性如图 13 所示。

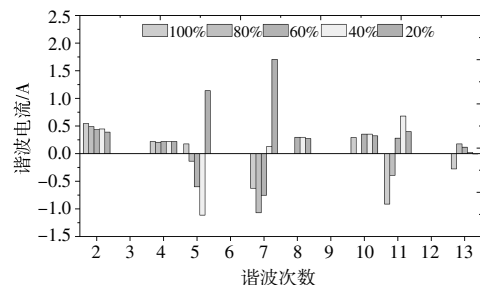


图 13 装设以 VC-综合赋权法配置的 APF 后风电场谐波电流

Fig.13 Harmonic current diagram of wind farm after installing APF with differential comprehensive weighting configuration

对比图 10 可以看出,5,7,11,13 次谐波有明显下降,所有谐波电流幅值均在 2.0 A 以内。20% 情况下 5,7 次谐波幅值较高,考虑实际运行中 20% 出力情况较少,对 APF 的消除谐波作用影响不大。验证了 VC-综合赋权法在 APF 优化配置中的关键性作用。

对比以单一工况配置的 APF,以 VC-综合赋权法配置的 APF 能更有效地削减 7,11,13 次其它工况下的谐波电流。验证了 VC-综合赋权法能有效中和不同工况下的谐波特性差异,从而提高 APF 治理谐波污染的效率,有效降低风电机组输出低次谐波含量。

5 结论

本文研究了风机低次谐波产生的机理,建立了风机低次谐波理论模型。针对不同工况下谐波污染的波动问题,提出了 VC-综合赋权法对 APF 进行优化配置,通过仿真验证后,得到以下主要结论。

①建立风机由死区产生的各低次谐波电压理论模型,并根据电流闭环传递函数推导出风机并网电流中的低频谐波含量。通过在 ETAP 平台的建模仿真验证了谐波低次理论分析的准确性。

②针对不同工况下的风机 APF 配置,采用 AHP 主观赋权法、CRITIC 客观赋权法分别计算权重,并提出一种变异系数法对主客观权重值进行系数分配的 VC-综合赋权法。使指标的差异性更加清晰,得到的综合权重值更加可信与合理。

③经过仿真验证,以本文提出的 VC-综合赋权法对 APF 进行优化配置后,治理谐波污染效果显著。对比以单一工况配置的 APF,VC-综合赋权法能更全面的考虑不同工况的谐波特性差异,更有效的治理风机的低次谐波污染。从而降低海上风电机组输出电能的低次谐波含量,有效解决“双碳”目标下大规模风电并网带来的谐波污染问题,提高大比例清洁能源并网电网的电能质量。

参考文献:

[1] 姚钢,杨浩猛,周荔丹,等.大容量海上风电机组发展现状及关键技术[J].电力系统自动化,2021,45(21):33-47.

[2] 蔡旭,杨仁焯,周剑桥,等.海上风电直流送出与并网技术综述[J].电力系统自动化,2021,45(21):2-22.

[3] 葛畅,阎洁,刘永前,等.海上风电场运行控制维护关键技术综述 [J]. 中国电机工程学报,2022,42(12):4278-4292.

[4] 李熊,阿辽沙叶,潘国兵,等.基于有序加权平均算子的电能质量评价方法 [J]. 可再生能源,2019,37(2):243-248.

[5] 余中平,关洪浩,余金,等.考虑储能容量的电网电能质量治理策略[J].可再生能源,2021,39(3):401-407.

[6] 康鹏,郭伟,黄伟钢,等.区域电网电能质量问题及治理关键技术综述[J].电测与仪表,2020,57(24):1-12.

[7] 迟永宁,梁伟,张占奎,等.大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(14):3758-3771.

[8] 马智泉,李培,徐群伟,等.海上风电场谐波异常的调查与试验分析[J].电网技术,2022,46(8):2928-2941.

[9] 何世恩,郑伟,智勇,等.大规模集群风电接入电网电能质量问题探讨 [J]. 电力系统保护与控制,2013,41(2):39-44.

[10] 班国邦,曾华荣,张露松,等.考虑死区与延时影响的 LCL 型并网逆变器谐波特性分析[J].电力科学与工程,2022,38(1):16-23.

[11] 吕志超.大规模海上风电并入电网后电能质量问题研究[D].淄博:山东理工大学,2020.

[12] 陈耀红,陈仲伟,陈剑,等.不同出力下双馈风力发电机谐波特性[J].电气应用,2015(24):64-68.

[13] 熊来红,单瑞卿,汪皓钰,等.不同风况和系统容量下双馈风机并网谐波特性研究 [J]. 电网与清洁能源,2011,27(12):106-111,117.

[14] 李庆,程鹏,王伟胜,等.考虑电网背景谐波影响的直驱风电机组谐波电流建模与分析[J].电网技术,2018,42(7):2178-2185.

[15] 赵宪,周力行,邓维.改进的层次分析法在含分布式电源系统电能质量综合评估中的应用[J].中国电力,2014,47(12):72-78.

[16] 吕志鹏,吴鸣,宋振浩,等.电能质量 CRITIC-TOPSIS 综合评价方法[J].电机与控制学报,2020,24(1):137-144.

[17] 薛宇,任永峰,胡志帅,等.基于九开关变换器的直驱-双馈分散式风电系统控制策略[J].电力系统自动化,2022,46(7):152-159.

[18] 年珩,周骥,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):5037-5048,5285.

[19] B Badrzadeh, M Gupta, N Singh, et al. Power system harmonic analysis in wind power plants - Part I: Study methodology and techniques [A].2012 IEEE Industry

- Applications Society Annual Meeting [C].Las Vegas: IEEE,2012.1-11.
- [20] S A Papathanassiou,M P Papadopoulos.Harmonic analysis in a power system with wind generation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21 (4): 2006-2016.
- [21] Moore, David C , Odavic, et al. Dead-time effects on the voltage spectrum of a PWM inverter[J].IMA Journal of Applied Mathematics,2014,79(6): 1061-1076.
- [22] 罗宁,贺墨琳,高华,等.基于改进的 AHP-CRITIC 组合赋权与可拓评估模型的配电网综合评价方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(16):86-96.
- [23] 李升.MATLAB 和 ETAP 电力系统仿真比较研究[J].南京工程学院学报(自然科学版),2006(2):50-55.
- [24] 郑杰,林涛,毕玥,等.基于电力系统分析软件 ETAP 的电网谐波分析[J].电网与清洁能源,2011,27(7):7-12.
- [25] 林涛,王思源,郑杰.基于 ETAP 的电力系统电能质量问题研究与分析 [J]. 电力科学与技术学报,2010,25(1):27-34.

Research on APF allocation optimization method of offshore wind power based on variation coefficient synthetic weighting method

Sheng Siqing, Bao Yanwen

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: With the proposal of the "double carbon" goal, the structure of the new power system with new energy as the main body has changed significantly, especially the access of large capacity offshore wind power units, which has brought harmonic and other power quality problems to the grid. In order to study the characteristics of low frequency harmonics generated by fan connection, firstly, a theoretical model of low frequency harmonic content in the grid-connected current of fan is established. Then, an offshore wind power simulation model is built on the simulation software ETAP to verify the output harmonic characteristics of the wind farm under different output conditions. Finally, based on the output harmonic characteristics of the wind farm, the variation coefficient synthetic weighting method is proposed to optimize the configuration of the active power filter (APF) in the wind farm to improve the control effect of the harmonic in the wind farm, and the effectiveness of the method is verified by simulation based on an actual example.

Keywords: offshore wind power; low harmonics; variation coefficient synthetic weighting; active filter