

新能源接入对电力系统谐波特性影响的多维度分析

赵云龙, 张嘉铭

(国网陕西省电力有限公司宝鸡供电公司)

【摘要】随着新能源发电技术的快速发展, 新能源接入电力系统已成为我国能源结构转型的重要方向。文章从多个维度分析了新能源接入对电力系统谐波特性的影响, 旨在为电力系统的安全稳定运行提供理论依据和技术支持。

【关键词】新能源接入; 电力系统; 谐波特性; 多维度分析; 谐波治理

中图分类号: TM935

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.060

Multi Dimensional Analysis of the Impact of New Energy Integration on Harmonic Characteristics of Power Systems

ZHAO Yun-long, ZHANG Jia-ming

(State Grid Shaanxi Provincial Power Co., Ltd. Baoji Power Supply Company)

【Abstract】With the rapid development of new energy generation technology, the integration of new energy into the power system has become an important direction for China's energy structure transformation. The article analyzes the impact of new energy integration on the harmonic characteristics of the power system from multiple dimensions, aiming to provide theoretical basis and technical support for the safe and stable operation of the power system.

【Keywords】new energy access; power system; harmonic characteristics; multidimensional analysis; harmonic control

1 引言

随着全球对清洁能源的需求增长, 新能源发电成为推动能源转型和实现“双碳”目标的关键。我国新能源装机容量持续上升, 主要包括风能、光伏、水力和生物质发电^[1]。然而, 这些通过电力电子设备接入电网的新能源设备会产生谐波, 影响电力系统稳定和电能质量。尽管已有研究在谐波源分析、分布影响、检测评估和治理技术方面取得进展, 但多聚焦于单一维度, 缺乏对新能源间歇性、随机性及不同类型设备谐波相互作用的全面考虑, 谐波动态变化研究也不足^[2]。本文旨在从多个维度对新能源接入电力系统谐波特性影响进行深入分析, 包括谐波源特性、传输特性、检测与评估方法以及谐波治理策略等。

2 新能源接入对电力系统谐波特性的影响分析

2.1 谐波源分析

新能源发电设备中的主要谐波源通常是电力电子逆变器, 其在能量转换过程中会产生大量谐波。以风力发电和光伏发电为例, 风力发电系统中的谐

波主要来源于风力机和发电机组成的整体, 以及与电网连接的电力电子逆变器, 其谐波产生机理可表示为:

$$V_h(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1)$$

式(1)中: $V_h(t)$ 为逆变器输出的谐波电压, V_n 为第 n 次谐波的幅值, ω 为基波角频率, ϕ_n 为第 n 次谐波的相位角。光伏发电系统中的谐波主要来源于光伏阵列和逆变器, 光伏逆变器通常采用脉宽调制(PWM)技术, 其输出电压可表示为:

$$v_{inv}(t) = \sum_{k=0}^N V_k \sqrt{2 \sin(\omega_k t + \theta_k)} \quad (2)$$

式(2)中: $v_{inv}(t)$ 为逆变器输出电压, V_k 为第 k 个开关脉冲的幅值, ω_k 为第 k 个开关脉冲的角频率, θ_k 为第 k 个开关脉冲的相位角, N 为开关脉冲的数量。逆变器在转换过程中产生的谐波主要与其开关频率、调制策略和负载条件有关, 变压器的非线性特性也会导致谐波的产生, 尤其是在其饱和区域工作时会更加明显^[3]。为了准确分析新能源发电设备对电力系统谐波特性的影响, 需要建立相应的谐波源模型。对于逆变器, 可采用诺顿等效电路来表示其谐波源特性:

$$I_h(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (3)$$

式(3)中: $I_h(t)$ 为等效谐波电流源, I_n 为第 n 次谐波电流的幅值。逆变器谐波源模型还可进一步表示为:

$$Z_h = R_h + jX_h$$

$$I_h(t) = (V_h(t))/Z_h \quad (4)$$

式(4)中: Z_h 为谐波阻抗, R_h 为等效电阻, X_h 为等效电抗, j 为虚数单位。对于变压器,其谐波模型可采用以下公式表示:

$$V_{2nd}(t) = V_{1st}(t) \cdot (1 + k \cdot \sin^2(\omega t)) \quad (5)$$

式(5)中: $V_{2nd}(t)$ 为二次侧的谐波电压, $V_{1st}(t)$ 为一次侧的基波电压, k 为变压器的非线性系数。

2.2 谐波传输特性分析

电网结构和谐波阻抗是影响谐波传输的关键因素。在理想情况下,电网可视为由电阻、电感和电容组成的分布式参数网络,谐波传输公式为

$$V_h(l) = V_{h0} e^{-\alpha l} \sin(\beta l + \phi) \quad (6)$$

式(6)中: $V_h(l)$ 是距离谐波源 l 处的谐波电压, V_{h0} 是谐波源处的谐波电压幅值, α 是衰减系数, β 是相位系数, l 是距离, ϕ 是初始相位角。不同电网结构如环网、辐射网和网状网,其谐波传输特性不同,环网中谐波可沿多路径传输,可能相互抵消或叠加;辐射网中谐波沿单一路径传输,会逐渐衰减;网状网则传输更复杂^[4]。线路阻抗 $Z_{line}(l) = R_{line} + jX_{line}$,衰减系数 $\alpha = R_{line}/(2Z_{line})$,相位系数 $\beta = \sqrt{4Z_{line}^2 - R_{line}^2}/(2Z_{line})$ 。

谐波阻抗方面,其由系统中的电感、电容和电阻组成,影响谐波的传输和放大。谐波电流 $I_h(l) = V_h(l)/Z_h(l)$,新能源接入后,系统谐波阻抗 $Z_h = Z_{sys} + Z_{new}$,谐波阻抗变化会导致谐波电流和电压变化,进而影响谐波传输。系统谐波阻抗低,谐波电流增大,问题严重;谐波阻抗高,谐波电流减小,问题较轻。谐波阻抗对谐波传输的影响可通过 $\Delta I_h = I_h(Z_{h,new}) - I_h(Z_{h,sys})$ 定量分析,其中 ΔI_h 是谐波阻抗变化导致的谐波电流变化量。

2.3 谐波检测与评估方法

谐波检测是保障电力系统稳定运行、提高电能质量的关键步骤,常用方法有傅里叶变换(FFT)、小波变换等。FFT可将时域信号转为频域分析,公式为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} \quad (7)$$

小波变换通过拉伸、压缩母小波匹配信号频率成分,公式为:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (8)$$

此外,基于瞬时无功功率理论、神经网络等方法在特定场景下也表现良好^[5]。为全面评估新能源接入后的谐波水平,需建立科学合理的评估指标体系,关键指标包括:谐波含有率(HR),即特定次数谐波电流或电压与基波电流或电压比值,公式为:

$$HR_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad (9)$$

总谐波畸变率(THD),评估信号畸变程度,公式为

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^N I_n^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (10)$$

电压不平衡度(UB),反映三相电压不平衡程度,公式为:

$$UB = \frac{\sqrt{(\Delta U_1)^2 + (\Delta U_2)^2 + (\Delta U_3)^2}}{U_{avg}} \times 100\% \quad (11)$$

3 新能源接入电力系统谐波治理策略

3.1 无源滤波器优化设计

3.1.1 滤波器参数优化

无源滤波器参数优化主要包括滤波器的电感(L)、电容(C)和电阻(R)值的确定。根据系统谐波特性和滤波器的设计目标,可以建立如下目标函数:

$$J = \min \left(\sum_{h=2}^n |H(h)|^2 \right) \quad (12)$$

式(12)中: $H(h)$ 是第 h 次谐波的传递函数, n 是考虑的最高谐波次数。基于系统谐波电流和电压,计算滤波器所需的品质因数(Q)。利用仿真软件(如MATLAB/Simulink)进行参数扫描,寻找最优的L和C值。表1为数据示例表。

表1 数据示例表

谐波次数	目标阻尼系数	优化后电感L (mH)	优化后电容C (μF)
3	0.707	1.2	50
5	0.707	0.8	30
7	0.707	0.6	20

3.1.2 滤波器布局优化

滤波器的布局优化旨在找到最佳的滤波器安装位置和连接方式,以最大化滤波效果和系统稳定性。

图1 不同滤波器布局下的谐波衰减效果比较。

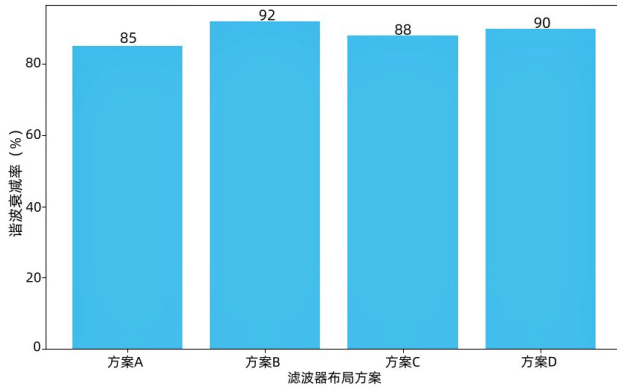


图1 不同滤波器布局下的谐波衰减效果比较

通过上图,方案B在所测试的布局中提供了最佳的谐波衰减效果。在实际操作中,还需要考虑滤波器的成本、安装复杂度以及系统运行的经济性。

3.2 有源滤波器控制策略

3.2.1 控制策略概述

有源滤波器通过注入与谐波电流大小相等、方向相反的补偿电流来消除电网中的谐波。以下是有源滤波器常用的基本控制策略概述。比例积分(PI)控制策略是最常用的控制方法之一,它通过比例和积分环节来减少稳态误差。其基本公式如下:

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (13)$$

式(13)中: K_p 是比例增益, K_i 是积分增益, s 是拉普拉斯变量。比例谐振(PR)控制策略则针对特定频率的谐波具有更好的控制效果,其传递函数可以表示为:

$$G(s) = K_p + K_r \frac{2\omega_r s}{s^2 + 2\omega_r s + \omega_r^2} \quad (14)$$

式(14)中: K_r 是谐振增益, ω_r 是谐振频率。表2是一个PI和PR控制策略参数设置的数据表示例。

表2 示例表

控制策略	比例增益 /KpKp	积分增益 /KiKi	谐振增益 /KrKr	谐振频率 /ωrωr
PI	0.5	20	-	-
PR	0.3	-	30	100π

3.2.2 新型控制策略研究

针对新能源接入电力系统的特点,如波动性、随机性和非线性,本文提出一种基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)的新型有源滤波器控制策略。该策略能够预测未来一段时间内的系统

状态,并优化控制输入以最小化谐波电流。

$$\min_{u(k+i)} \sum_{i=0}^{N_p-1} (|i_h(k+i)|^2 + \rho |u(k+i)|^2) \quad (15)$$

式(15)中: $u(k+i)$ 是未来第*i*步的控制输入, $i_h(k+i)$ 是预测的谐波电流, ρ 是控制输入权重系数, N_p 是预测步长。图2是新型MPC控制策略下谐波电流补偿效果。

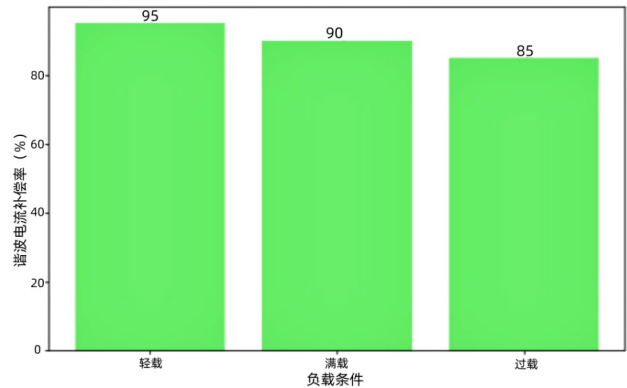


图2 新型MPC控制策略下的谐波电流补偿效果

可以看出,新型MPC控制策略在轻载、满载和过载条件下均能有效地补偿谐波电流,在轻载条件下,补偿效果更为显著。新型控制策略具有良好的鲁棒性和适应性,适用于新能源接入的电力系统。

4 结语

本文从多个维度分析了新能源接入对电力系统谐波特性的影响,提出了相应的谐波治理策略。研究成果为电力系统的安全稳定运行提供了理论依据和技术支持,具有一定的创新性和实用价值。

参考文献

- [1] 余光海, 李鹏. 新能源互补电力主网谐波补偿孤岛检测方法研究[J]. 能源与环保, 2022, 44 (3): 242-247+254.
- [2] 孙媛媛, 许庆燊, 马钊, 等. 数字化背景下新型电力系统谐波溯源关键技术[J]. 电力系统自动化, 2024, 48 (6): 154-169.
- [3] 徐先峰, 马文昊, 卢勇, 等. 基于充电站谐波特性的频率自适应有源电力滤波控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52 (21): 24-34.
- [4] 李建闽, 曹远远, 姚文轩, 等. 基于自适应移频滤波的电力系统谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39 (13): 4015-4024.
- [5] 兰金晨, 林焱, 方晓玲, 等. 考虑新能源不确定性的电网谐波污染预测评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36 (8): 1-12.