

瞬态电磁干扰下变电站谐振过电压抑制研究

代庆超¹
DAI Qingchao

摘要

瞬态电磁干扰（如开关操作、雷击、短路故障等）会产生高频脉冲和暂态过程，激发变电站内的电感-电容（LC）谐振回路，导致谐振过电压，传统的抑制方法多基于调整系统参数原理实现，存在针对性弱、抑制效果不佳等问题。基于此，文章进行了瞬态电磁干扰下变电站谐振过电压抑制方法研究。首先，识别瞬态电磁干扰源，通过监测和分析变电站内电磁信号，确定主要干扰源类型与特征。运用信号处理技术，获取其幅值、频率等关键参数，提取变电站谐振过电压特征；然后，以此为基础，设计变电站谐振过电压主动补偿抑制方法，利用电力电子装置实时监测并产生反向补偿电流，抵消谐振过电压。实验结果表明，所提方法主动补偿抑制效果显著，能够有效降低谐振过电压的各项参数，提高电网的电能质量和稳定性，与传统方法相比，总谐波畸变率显著降低，电压波形更加平稳，未出现明显的振荡和畸变，能够有效消除谐振过电压的影响。

关键词

瞬态电磁干扰；变电站；谐振；过电压；抑制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.12.029

0 引言

变电站作为电力系统的重要节点，其内部配置了多种高压电气设备和低压电子装置。在日常运行过程中，这些设备会产生显著的工频电磁场环境。特别是在断路器动作、电网出现异常或遭受雷击等情况下，会激发强烈的暂态电磁场，从而形成电磁干扰现象^[1]。在各类暂态电磁干扰现象中，铁磁谐振过电压尤其值得关注。针对中性点绝缘运行的电网结构，随着对地分布电容参数的变化，加之电磁式电压互感器、无载变压器等设备固有的非线性电磁特性，在特定工况下极易激发铁磁谐振现象。由此产生的过电压峰值可达额定值的2~3倍，若无有效防护措施，将直接导致绝缘击穿和设备损毁等重大事故。传统的过电压抑制方法虽然取得了一定的研究成果，但是仍然存在不足。其中，文献[2]提出的方法采用在变电站关键节点加装耗能电阻来实现过电压抑制，但是该方法存在电阻元件长期发热导致的性能劣化问题。文献[3]提出的方法通过优化开关操作时序来实现抑制，然而机械部件的磨损问题会影响操作准确性，进而影响抑制效果。

基于此，本文提出了瞬态电磁干扰下变电站谐振过电压抑制方法研究，以提高变电站运行的安全性与可靠性。

1 瞬态电磁干扰源识别

根据变电站电磁环境特性，在变电站的关键位置，布置多种类型的传感器，构建覆盖全站的立体监测网络，以监测

瞬态电磁干扰源的动态变化^[4]。传感器选型与布置方案如表1所示。

表1 传感器选型与布置

序号	布置位置	传感器类型	监测内容
1	断路器断口处	罗氏线圈	瞬态电流
2	电压互感器二次端子	容性分压器	瞬态对地电压
3	保护屏柜接地排	高频电流互感器	电缆屏蔽层耦合电流
4	主控室电缆沟	三维电场探头	空间电磁场强
5	避雷器接地引下线	暂态电压传感器	雷击过电压波形

按照表1，完成传感器部署后，利用数据采集系统，对传感器获取的信号进行实时、连续地记录。采样频率高于干扰信号最高频率的2~3倍，时间同步精度 $\leq 1\ \mu\text{s}$ ，以确保能够捕捉到快速变化的瞬态电磁干扰信号^[5]。

采用数字滤波算法，去除采集的瞬态电磁干扰信号中的噪声，用公式表示为：

$$\hat{s}(t) = \sum_{j=1}^N T_{\lambda_j}(W_{j,t}) \cdot \psi_{j,t}(t) \quad (1)$$

式中： $W_{j,t}$ 表示小波系数； T_{λ_j} 表示软阈值函数； λ_j 表示自适应阈值； $\psi_{j,t}(t)$ 表示小波基函数。

干扰源智能识别采用多尺度卷积神经网络，输入滤波后的瞬态电磁干扰信号，经过多层卷积、池化和全连接操作，输出瞬态电磁干扰源的类型，公式表示为：

1. 河南送变电建设有限公司 河南郑州 457000

$$y_j^l = f\left(\sum_{i \in M_j} \hat{s}(t) x_i^{l-1} \cdot k_{ij}^l + b_j^l\right) \quad (2)$$

式中： y_j^l 表示第 l 层第 j 个神经元的输出； x_i^{l-1} 表示第 $l-1$ 层第 i 个神经元的输出； k_{ij}^l 表示卷积核； b_j^l 表示偏置项； M 表示输入干扰信号特征图的感受野。

通过上述公式，根据模型的输出结果确定瞬态电磁干扰源的类型。

2 变电站谐振过电压特征提取

在完成瞬态电磁干扰源识别后，提取瞬态电磁干扰下变电站谐振过电压特征，为后续抑制策略的制定提供数据支撑。

采用基于多维度特征融合的谐振过电压分析方法，从时域、频域和小波能谱熵三个维度全面表征变电站谐振过电压特性。利用时域参数计算方法，提取时域特征量：

$$U_0 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{3N} (u_i - \bar{u})^2} \quad (3)$$

$$K_u = \frac{U_0}{U_{ph}} \times 100\% \quad (4)$$

$$K_r = \frac{E[(U_0 - \mu_0)^4]}{\sigma_0^4} \quad (5)$$

式中： N 表示变电站谐振过电压每相采样点数； u_i 表示瞬时电压值，反映了电压在某一时刻的具体数值； $\bar{u}$ 表示三相电压平均值，用于衡量三相电压的整体水平； U_0 表示零序电压有效值，直观地反映谐振强度，有效值越大，说明谐振越强烈； K_u 表示电压畸变率，反映了谐振对电压波形的影响程度，畸变率越高，电压波形偏离正常状态越严重； U_{ph} 表示相电压额定值，作为电压的标准参考值； K_r 表示零序电压峭度，该参数可有效检测暂态冲击，峭度值的变化往往预示着系统中出现了瞬态扰动； μ_0 表示零序电压均值； σ_0 表示标准差，反映了电压数据的离散程度^[6]。

在频域维度，变电站谐振过电压的频域特征量通过 db4 小波进行 8 层分解得出^[7]。各尺度对应频带如表 2 所示。

表 2 变电站谐振过电压小波频带分解参数

序号	尺度	频带范围 /Hz	能量占比 /%
1	A1	1 250~2 500	12.5
2	A2	625~1250	8.7
3	A3	312.5~625	15.2
4	A4	156.25~312.5	22.4
5	A5	78.12~156.25	28.6
6	A6	39~78.12	9.3
7	A7	19.5~39	2.8
8	A8	0~19.5	0.5

通过表 2，明确各种类型谐振的频带范围与对应尺度。

变电站谐振过电压的小波能谱熵特征量提取公式为：

$$H = -\sum_{j=1}^8 p_j \ln p_j \quad (6)$$

式中： H 表示小波能谱熵，反映了信号在频域上的能量分布复杂程度； p_j 表示第 j 尺度下各频带区间能量在尺度信号中的占比情况^[8]。

通过上述流程的实施，实现瞬态电磁干扰下变电站谐振过电压特征量的提取目标，为后续谐振过电压主动补偿抑制提供了有力的支持。

3 变电站谐振过电压主动补偿抑制

基于前期提取的瞬态电磁干扰下变电站谐振过电压特征参数，采用多变量优化算法计算最优补偿电流，公式表示为：

$$I_c = K_p \cdot \Delta U + K_i \cdot \Delta U dt + K_d \cdot \frac{d(\Delta U)}{dt} \quad (7)$$

式中： ΔU 表示变电站实测过电压幅值与阈值的差值，用于判断谐振过电压严重程度，差值越大，说明谐振过电压对电网的威胁越严重； K_p 、 K_i 、 K_d 均表示自适应调节系数，根据谐振频率动态调整。基于计算得出的补偿电流幅值，确保补偿电流相位与谐振电压反相，以实现有效的补偿效果^[9]。对于含有多次谐波的谐振情况，需叠加特定频率补偿，公式表示为：

$$I_h = \sum_{n=2}^7 \frac{U_n}{Z_n} \cdot \sin(n\omega t + \phi_n + \pi) \quad (8)$$

式中： U_n 表示 n 次谐波电压； Z_n 表示电力系统 n 次谐波阻抗； I_h 表示谐波补偿电流瞬时值； ω 表示工频角频率； ϕ_n 表示第 n 次谐波电压初始相位角； π 表示相位反转常数^[10]。

通过上述流程的实施，完成变电站谐振过电压补偿参数的计算。在此基础上，为了达到最佳的补偿效果，需要根据谐振特征、已识别的干扰源类型与装置性能的匹配关系，制定最优的补偿策略，如表 3 所示。

表 3 谐振过电压主动补偿策略

序号	过电压特征	补偿装置	补偿策略
1	高频谐振	固态开关+LC 滤波器	脉冲电流注入
2	工频铁磁谐振	SVG 补偿装置	动态无功调节
3	分频谐振	有源阻尼器	阻抗匹配控制
4	暂态过电压	超快速真空开关	能量泄放
5	复合型谐振	多模式复合补偿系统	协同控制

在具体实施针对瞬态电磁干扰下变电站谐振过电压的抑制工作时，当检测到谐振过电压并确定补偿策略后，基于表 3 的主动补偿抑制策略，立即启动相应的主动补偿装置。对补偿装置产生的补偿电流进行实时跟踪控制，利用传感器、控制器与快速响应执行机构，形成闭环控制系统，使其能够

快速、准确地跟踪设定的补偿电流值，实时监测补偿电流的实际值，并与设定值进行对比分析，一旦发现偏差，立即进行调整，使补偿电流始终保持在最佳状态，从而实现对瞬态电磁干扰下变电站谐振过电压的有效抑制。

4 实验测试

4.1 实验准备

选择 S 配电网络的 110 kV 变电站供区 10 kV 系统为研究对象。该变电站的组成如表 4 所示。

表 4 变电站组成

序号	项目	参数
1	主变	2 台
2	总容量	80 MVA
3	线路	两台主变分别供 1、2 段 10 kV 母线， 10 kV 有 8 回出线
4	配置	两端母线上分别有两台 10 kV 电磁式 PT、两回电容器及 10 kV 接地变。

该研究对象的配置在实际电网中较为常见，具有代表性，能够满足一定区域内的电力需求。在配置上，两端母线上分别配置了两台 10 kV 电磁式 PT，用于电压测量和保护；两回电容器则能够提供无功补偿，提高电网的功率因数；10 kV 接地变在保障电网安全运行方面发挥着重要作用。这种配置便于研究瞬态电磁干扰下变电站谐振过电压的抑制方法是否可行。因此，对该研究对象展开研究，所取得的成果将具有广泛的适用性。

4.2 抑制效果分析

基于所选实验对象的实测数据，对本文提出的主动补偿抑制方法进行了系统验证。实验过程中，分别测量抑制前后电网中的谐振过电压成分参数并作出对比，结果如表 5 所示。

表 5 谐振过电压成分数据对比

	高频振荡 能量 /dB	暂态持续 时间 /s	相间不平 衡度 /%	能量熵
抑制前	45	18	15	2.1
抑制后	28	0.6	4	0.9

通过分析表 5 的谐振过电压成分参数可知，上文提出的抑制方法应用后取得了显著成效。其中，高频振荡能量降幅达到了 17 dB，表明该方法能够有效削减电网中高频振荡的能量，减少了因高频振荡可能引发的设备损坏和系统不稳定风险，电网中的电磁干扰得到了减少。暂态持续时间的缩短表明本文方法能够快速响应并抑制谐振过电压，使电网迅速恢复到稳定状态。相间不平衡度的降低有助于提高电网的电能质量，减少因相间不平衡导致的设备损耗和发热问题。

能量熵的降低说明本文方法能够使电网中的能量分布更加有序，减少了能量的无序损耗，提高了电网的运行效率。

进一步将本文提出的谐振过电压抑制方法与文献 [2-3] 提出的两种传统抑制方法的谐振过电压抑制效果进行了对比。对比结果如图 1 所示。

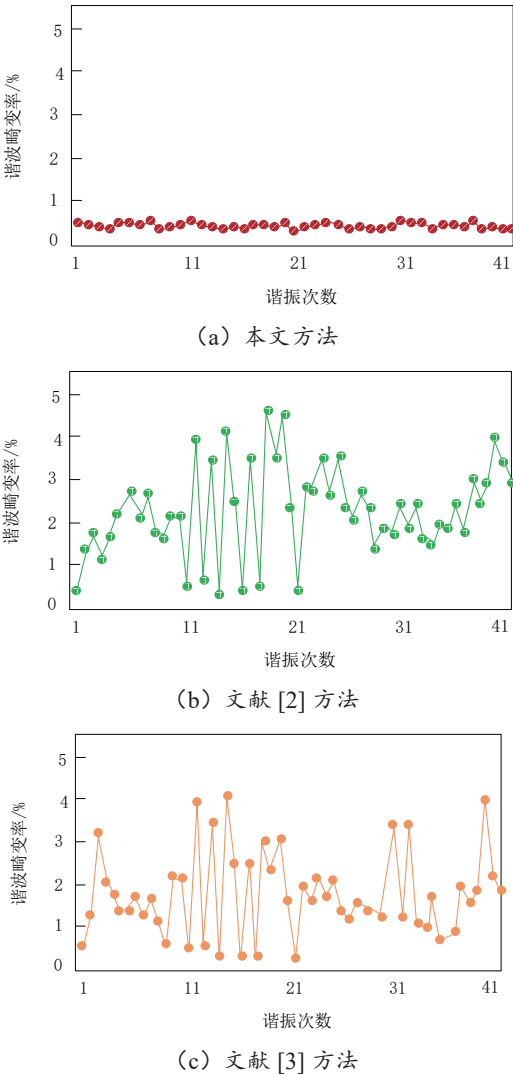


图 1 谐振过电压抑制效果对比

由图 1 的对比结果可知，在应用本文方法后，电网中的谐振过电压得到了明显的抑制，总谐波畸变率显著降低，电压波形更加平稳，未出现明显的振荡和畸变，能够有效地消除谐振过电压的影响。而两种传统方法虽然在一定程度上能够降低谐振过电压的幅值，但电压波形仍存在较大的波动，且高次谐波的含量相对较高，抑制效果较差。综上所述，本文提出的主动补偿抑制方法在抑制瞬态电磁干扰下的变电站谐振过电压方面具有显著的应用效果优势。能够更有效地降低谐振过电压的各项参数，提高电网的电能质量和稳定性，与传统的抑制方法相比，在抑制效果和稳定性等方面均具有明显优势。

(下转第 128 页)

- The Zynq book: embedded processing with the ARM Cortex-A9 on the Xilinx Zynq-7000 all programmable soc[EB/OL]. (2014-07-14)[2025-11-22].<https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/2685817>.
- [11]BASSHAM L E, RUKHIN A L, SOTO J, et al. SP 800-22 rev. 1a. a statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications[EB/OL].(2010-04-01)[2025-11-22].<https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/2206233>.
- [12]DJ-on-GitHub, sp800_22_tests[EB/OL].[2025-11-02].https://github.com/dj-on-github/sp800_22_tests.
- [13]HABIB B, GAJ K, KAPS J P. FPGA PUF based on programmable LUT delays[C]//2013 Euromicro Conference on Digital System Design. Piscataway:IEEE, 2013: 697-704.
- [14]RABIEI H, KAVEH M, MOSAVI M R, et al. MCRO-PUF: a novel modified crossover RO-PUF with an ultra-expanded CRP space[J].Computers, materials and continua, 2023, 74(3): 4831-4845.

- [15]NALLA ANANDAKUMAR N, HASHMI M S, SANADHYA S K. Compact implementations of FPGA-based PUFs with enhanced performance[C]//2017 30th International Conference on VLSI Design and 2017 16th International Conference on Embedded Systems (VLSID). Piscataway: IEEE, 2017: 161-166.
- [16]ZHANG Y, LIANG H G, YAO L, et al. A high reliability physically unclonable function based on multiple tunable ring oscillator[J].Microelectronics journal, 2021, 117: 105263.

【作者简介】

余方计（1999—），通信作者（email:505272772@qq.com），男，河南商丘人，硕士研究生，研究方向：计算机智能技术与应用。

范小娇（1978—），女，河南焦作人，博士，副教授，研究方向：物联网技术与应用、集成电路新型材料和器件研究。

（收稿日期：2025-07-01 修回日期：2025-12-11）

（上接第 123 页）

5 结语

本研究围绕瞬态电磁干扰下变电站谐振过电压这一问题展开了深入探索，提出了针对性的主动补偿抑制方法。研究结果表明该方法在抑制谐振过电压方面取得了显著成效，高频振荡能量、暂态持续时间、相间不平衡度和能量熵等关键参数均得到大幅优化，电网中的谐波含量显著降低，总谐波畸变率明显下降，有效提高了电网的电能质量和稳定性。同时，与传统的抑制方法相比，所提方法在抑制效果和稳定性等方面均展现出明显优势。未来，将进一步优化主动补偿抑制方法，提高其适应性和智能化水平，以应对更为复杂多变的运行环境，加强与实际工程的结合，为电力系统的安全可靠运行提供更加坚实的保障。

参考文献：

- [1] 向常圆, 宋宝同, 李笑彤, 等. 北京地区 500 kV 变电站 66 kV 侧 PT 间隔故障仿真及铁磁谐振过电压抑制方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(3):77-84.
- [2] 石小帅, 顾智广, 仲昭峰, 等. 基于 PSCAD 的自耦变空载投运谐振过电压仿真分析[J]. 电工技术, 2023(21):150-151.
- [3] 刘其辉, 吴勇, 闫佳颖, 等. 考虑相位跳变的双馈风电机组低电压穿越特性分析与暂态过电压抑制[J]. 太阳能学报, 2024, 45(5):86-94.

- [4] 董成武, 牛芳, 夏林伟, 等. 两级式单相光伏逆变器并网过电压抑制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11):134-141.
- [5] 杜明珠, 张鹏鹏. 新能源汽车电气系统瞬变过电压抑制技术[J]. 时代汽车, 2024(19):113-115.
- [6] 王蒙, 张文朝, 汪莹, 等. 高比例光伏接入的电力系统暂态过电压控制策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10):148-155.
- [7] 闫佳颖, 刘其辉, 李开心, 等. 直流换相失败故障下 DFIG 暂态特性分析与过电压抑制[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3912-3920.
- [8] 黄浪尘, 李俊桦, 何东, 等. 一种基于 MOV-RC 缓冲电路的中压直流固态断路器过电压抑制方法研究[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(9):51-63.
- [9] 刘杉, 谭开东, 姜喆, 等. 基于可控自恢复消能装置的直流送端暂态过电压抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(9): 142-150.
- [10] 姚创, 魏菊芳, 崔涵, 等. 基于流敏电阻非有效接地系统 PT 谐振过电压抑制[J]. 电瓷避雷器, 2023(1):191-198.

【作者简介】

代庆超（1983—），男，山东冠县人，本科，高级工程师，研究方向：电力建设、电气设备安装和调试。

（收稿日期：2025-05-28 修回日期：2025-11-28）