

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.054

基于 RBF 神经网络的送端电力系统暂态过电压控制方法

魏楠¹, 徐尧宇¹, 贾鸿屹¹, 安之¹, 陈天一²

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031)

摘要:由于难以捕捉送端电力系统故障引发的时变特性,导致暂态过电压的控制稳定性不佳。对此,提出基于 RBF 神经网络的送端电力系统暂态过电压控制方法。基于短时傅里叶变换将非平稳电压信号分解为时频矩阵,捕捉暂态过电压的时变特性。利用高斯核函数自适应拟合时频特征与幅值的非线性映射,结合 RBF 网络模型预测暂态过电压幅值。采用生成对抗网络交替优化生成器与判别器损失函数,生成最优控制策略。实验结果表明:应用该方法进行暂态过电压控制时,柔性直流输电系统模型的平均电压波动率为 $\pm 1.8\%$,具备较为理想的控制稳定性。

关键词:RBF 神经网络;送端电力系统;暂态过电压;控制方法;生成对抗网络

中图分类号:TM711 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)04-0287-04

Transient Overvoltage Control Method of Feeder Power System Based on RBF Neural Network

Wei Nan¹, Xu Yaoyu¹, Jia Hongyi¹, An Zhi¹, Chen Tianyi²

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute, Beijing 102209, China;

2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract:Due to the difficulty in capturing the time-varying characteristics caused by faults in the transmission end power system, the control stability of transient overvoltage is often poor. A transient overvoltage control method for the sending-end power system based on RBF neural network is proposed. Based on the short-time Fourier transform (STFT), the non-stationary voltage signal is decomposed into a time-frequency matrix to capture the time-varying characteristics of transient overvoltage. The Gaussian kernel function is used to adaptively fit the nonlinear mapping between time-frequency features and amplitude, and the transient overvoltage amplitude is predicted in combination with the RBF network model. A generative adversarial network (GAN) is employed to alternately optimize the loss functions of the generator and discriminator, generating an optimal control strategy. Experimental results show that when this method is applied for transient overvoltage control, the average voltage fluctuation rate of the flexible DC transmission system model is $\pm 1.8\%$, demonstrating ideal control stability.

Keywords:RBF neural network; sending-end power system; transient overvoltage; control method; generative adversarial network (GAN)

0 引言

在直流输电系统中,当高压直流发生闭锁故障时,送端电网可能会出现暂态过电压,导致风电场面临脱网风险,进而影响直流功率的外送^[1-2]。

近年来,国内学者针对送端电力系统暂态过电压控制展开广泛研究。闫佳颖等^[3]利用高频阻抗特性抑制特快速暂态过电压高频成分,但对低频效果有限;刘其辉等^[4]通过快速转换新能源过剩能量避免暂态过电压,但需精确控制能量转换

时机和量;尚磊等^[5]优化 DFIG 控制策略以降低直流换相失败时的暂态过电压幅值,但控制稳定性受运行状态影响;彭茂兰等^[6]改进双馈风电机组控制算法以保持相位跳变时输出电流稳定,但对控制系统复杂性和实时性要求较高。

对此,本文充分考虑了水电和光伏发电系统的运行特性,设计了基于 RBF 神经网络的暂态过电压预测模型,准确预测故障或扰动情况下送端电力系统的暂态过电压水平,抑制过电压。

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5100-202356395A-2-4-KJ)

第一作者简介:魏楠(1992—),男,江西上饶人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统规划,chenqiongya5809@163.com。

通信作者简介:安之(1989—),男,山东泰安人,高级工程师,博士,研究方向为电力系统规划、电力系统分析与控制,anzhi678536@163.com。

1 送端电力系统暂态过电压控制方法设计

1.1 暂态过电压信号联合时频分析

假设原始暂态过电压信号为 $x(\tau)$, 该信号可能由雷击、开关分合闸或系统故障引发, 为对信号的幅值、频率变化展开精准捕捉, 对其进行信号分帧处理^[7-8]。将信号 $x(\tau)$ 按照固定的时间窗长度 T_w 以及重叠率 O 进行分割处理, 每帧的暂态过电压信号长度为 $N=f_s \cdot T_w$, 其中 f_s 代表采样频率。对每帧信号进行离散傅里叶变换处理。具体变换表达式为

$$X_m(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_m(n)w(n)e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (1)$$

式中: $X_m(k)$ 为暂态过电压信号第 m 帧的频谱; k 为频率索引; $w(n)$ 为窗函数; $x_m(n)$ 为第 m 帧暂态过电压信号^[9]。将所有帧的频谱结果按时间顺序排列, 形成二维时频矩阵

$$S(m,k) = |X_m(k)|, \quad m=1,2,\dots,M \quad (2)$$

式中 M 为具体暂态过电压信号的总帧数。为对信号的随机性进行量化, 对暂态过电压信号时频熵进行计算, 公式如下所示

$$\begin{cases} H(m) = -\sum_{k=0}^{N-1} p(m,k) \lg p(m,k) \\ p(m,k) = \frac{S(m,k)}{\sum_{k=0}^{N-1} S(m,k)} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 暂态过电压幅值预测

设定 RBF 网络的输入层包括暂态过电压信号时频能量分布 $E(m)$ 、主频带能量比 $R(m)$ 以及时频熵 $H(m)$, 以此构建输入特征向量 $\mathbf{x} = [E(m), R(m), H(m), \dots]^T$ ^[10-11]。假设送端电力系统数据集为 $\{x_j\}_{j=1}^N$, 从该数据集中选取 L 个聚类中心 $\{c_i\}_{i=1}^L$, 并结合距离计算公式对径向基函数 $\phi(\cdot)$ 的带宽参数 σ 进行计算^[12-14]。具体计算公式如下所示

$$\sigma = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{\sum_{\mathbf{x} \in C_i} \|\mathbf{x} - \mathbf{c}_i\|}{|C_i|} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{c}_i$ 为第 i 个径向基函数的中心向量, 即从多个过电压事件数据中选取的代表性时频特征向量; C_i 为第 i 个聚类中的样本集合, C_i 包含与 $\mathbf{c}_i$ 相似的所有训练样本^[15-17]。例如, 若 $\mathbf{c}_i$ 对应雷击

过电压, 则 C_i 中的样本可能均来自雷击事件。由此可得到隐藏层输出 $\Phi_{\text{new},i}$ 表达式如下所示

$$\Phi_{\text{new},i} = \phi(\|\mathbf{x}_{\text{new}} - \mathbf{c}_i\|) \quad (5)$$

式中 $\mathbf{x}_{\text{new}}$ 代表新的暂态过电压时频特征向量。最终得到的暂态过电压幅值预测表达式如下所示

$$y_{\text{new}} = \sum_{i=1}^L w_i \cdot \Phi_{\text{new},i} \quad (6)$$

式中: y_{new} 为输出层对于暂态过电压的预测结果; w_i 为训练权重。

1.3 暂态过电压控制

利用生成对抗网络 (GAN) 生成控制动作 u , 使系统状态 s 下的过电压幅值 y 最小化, 同时满足控制代价约束^[18]。设定系统状态为 $\mathbf{s} = [y', T, L_{\text{load}}]^T$, 其中, y' 代表 RBF 网络预测的过电压幅值, T 为电网拓扑, L_{load} 为负载水平^[19-20]。设定过电压控制动作为 $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_N]^T$, 包括无功补偿量、断路器动作时间等。则 GAN 网络的生成器 G 输入随机噪声 z , 输出为对应的控制动作 $\mathbf{u} = G(z)$ 。判别器 D 的输入为系统状态-控制对 $(\mathbf{s}, \mathbf{u})$, 输出为暂态过电压控制效果的评分 $D(\mathbf{s}, \mathbf{u})$ ^[21]。二者对应的损失函数表达式如下所示

$$L_G = E_{z \sim P_z(z)} [\lg(1 - D(\mathbf{s}, G(z)))] + E_{z \sim P_z(z)} [y(G(z), \mathbf{s})] \quad (7)$$

$$L_D = -E_{(\mathbf{s}, \mathbf{u}^*) \sim P_{\text{data}}} [\lg D(\mathbf{s}, \mathbf{u}^*)] - E_{z \sim P_z(z)} [\lg(1 - D(\mathbf{s}, G(z)))] \quad (8)$$

式中: 生成器损失函数 L_G 第 1 项为对抗损失, 第 2 项代表过电压幅值损失; $\mathbf{u}^*$ 为最优控制动作; $y(G(z), \mathbf{s})$ 为在状态 $\mathbf{s}$ 下应用过电压控制动作 $G(z)$ 后的过电压幅值; $D(\mathbf{s}, G(z))$ 为判别器对生成过电压控制动作 $G(z)$ 在状态 $\mathbf{s}$ 下的评分^[22]; $P_z(z)$ 为随机噪声的分布概率; P_{data} 为系统状态 $\mathbf{s}$ 和真实最优控制动作 $\mathbf{u}^*$ 之间的联合概率分布^[23-24]。采用两个损失函数分别对判别器和生成器进行训练, 训练完成后, 将生成的控制动作 $\mathbf{u}^*$ 应用于电力系统, 实现暂态过电压的有效抑制。

2 实验

实验选取的送端电力系统包括直流输电的送端交流电力系统和换流站。为了对暂态过电压情况进行模拟, 实验设定了两种不同的故障类型, 分别为交流单相接地故障以及直流桥臂短路故障。具体故障场景参数配置如表 1 所示。

表 1 故障场景参数配置

故障类型	场景 1: 交流单相 接地故障	场景 2: 直流桥臂 短路故障
故障位置	500 kV 交流线路 (距换流站 100 km 处)	柔性直流换流器正极桥 臂(子模块编号 150~160)
故障 电阻/ Ω	0.10(模拟永久性接地)	0(金属性短路)
故障发生 时刻/s	10(系统运行)	20(系统运行)
故障持续 时间/s	0.20(模拟瞬时性 故障后自动切除)	0.10(模拟保护装置 快速动作切除)
过电压 幅值/p.u.	2.15(故障瞬间峰值)	1.98(桥臂电流激增导致)
频率 偏差/Hz	-0.20(有功功率 波动引起)	+0.15(直流功率 中断后恢复)
直流电流 变化率/A/ms	1 200(故障后 50 ms 内)	3 000 (桥臂短路瞬间)

采用 PSCAD 仿真工具建立 ± 800 kV 柔性直流输电系统仿真模型,并加载初始运行工况,稳定运行 10 s。在 $t=10$ s 时分别施加交流单相接地故障(场景 1)以及直流桥臂短路故障(场景 2),并结合 3 种方法同步启动控制,记录动态响应数据。选取的基于频敏高-低阻层叠母线结构的特快速暂态过电压高频成分抑制方法和基于能量同步转换技术的高比例新能源外送地区暂态过电压抑制方法作为对比方法。

采用 RBF 神经网络模型得到的暂态过电压预测损失分布情况如图 1 所示。

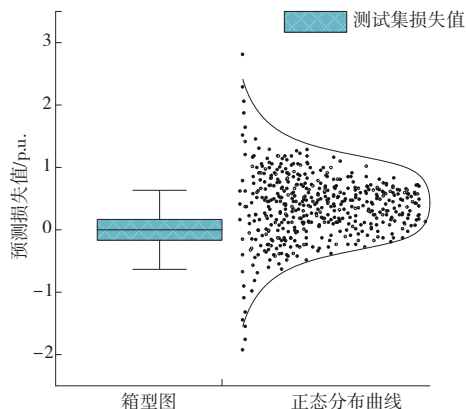


图 1 暂态过电压预测损失箱型图及正态分布曲线

由图 1 可知,预测误差中位数接近零,四分位距狭窄(0.002~0.008),误差集中在低值区间。同时正态分布曲线与箱型图高度吻合,表明本文方法能够显著降低预测误差的离散度以及偏态,获得精度较高的暂态过电压预测结果。

记录了采用本文方法在两种故障状态下的暂态过电压控制结果,如图 2 和图 3 所示。

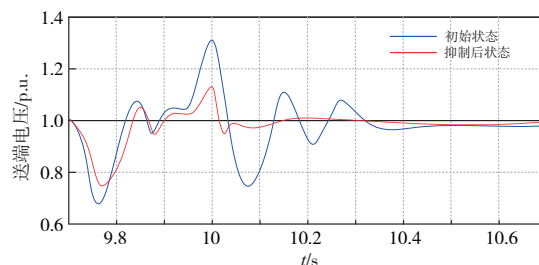


图 2 交流单相接地故障场景下的暂态过电压控制结果

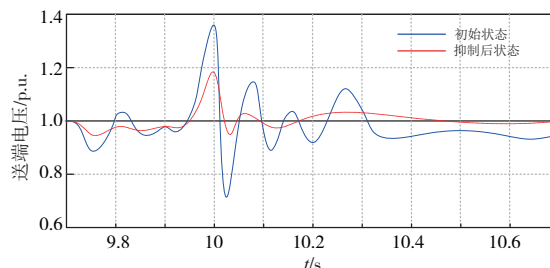


图 3 直流桥臂短路故障场景下的暂态过电压控制结果

由图 2、图 3 可知,两种故障发生时($t=10$ s),本文方法均可有效抑制过电压峰值,同时缩短恢复进程,两种场景下的过电压峰值均被抑制在 1.2 p.u.以内。表明本文方法能够在不同复杂工况下实现过电压的快速精准控制。

以不同控制方法下的电压波动率作为对比指标,对方法的控制稳定性进行衡量,实验结果如图 4 所示。

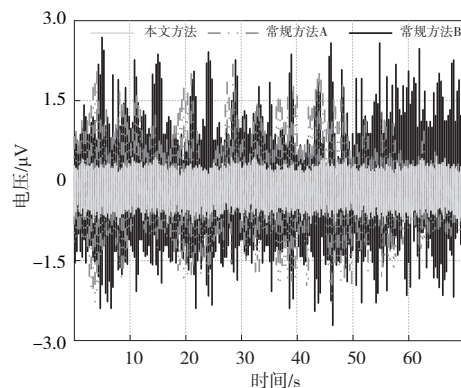


图 4 不同控制方法下的电压波动情况对比结果

由图 4 可知,相较于两种常规的过电压控制方法,本文控制方法下,柔性直流输电系统的电压波动幅度显著更小,平均电压波动率为 $\pm 1.8\%$,表明本文方法具有更加稳定的控制效果。

3 结语

本文提出的基于RBF神经网络的送端电力系统暂态过电压控制方法,通过联合时频分析、幅值预测与控制策略优化3个核心环节的协同作用,成功实现了对复杂工况下暂态过电压的高效抑制,提高了电力系统的运行稳定性和可靠性,这有助于为暂态过电压控制提供新的理论思路和方法。

参考文献:

- [1] 李红斌,韩林汕,叶国雄,等. 基于频敏高-低阻层叠母线结构的特快速暂态过电压高频成分抑制方法[J]. 电工技术学报,2022,37(19):4969-4977.
- [2] 田旭,刘飞,张君,等. 基于能量同步转换技术的高比例新能源外送地区暂态过电压抑制研究[J]. 南方电网技术,2022,16(10):95-103.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 尚磊,唐王倩云,苏适,等. 构网型无功补偿抑制新能源送端暂态过电压[J]. 电力工程技术,2024,43(2):83-93.
- [6] 彭茂兰,冯雷,王宇,等. 基于桥臂调制波调整的多端柔直系统直流过电压抑制策略[J]. 中国电力,2024,57(4):171-181.
- [7] 牛嘉琪. 分布式新能源接入暂态过电压机理及抑制方法综述[J]. 电瓷避雷器,2023(6):66-74.
- [8] 李文竹,寇汉鹏. 考虑暂态过电压抑制的新能源送出型电网无功优化方法[J]. 电瓷避雷器,2023(6):117-125.
- [9] 王奇,董新胜,何山. 抑制高压直流故障引起风电场暂态过电压控制策略[J]. 电气传动,2024,54(10):76-82,96.
- [10] 杨浩,刘虎,丁肇豪,等. 计及短路比提升与暂态过电压抑制的含高比例风电送端电网两阶段式调相机优化配置[J]. 电网技术,2024,48(2):540-551.
- [11] 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.
- [12] 连攀杰,刘文焯,孙华东,等. 混合级联多端直流暂态过电压机理及抑制措施[J]. 中国电机工程学报,2024,44(13):5037-5051.
- [13] 何奇,王海亮,谢琼瑶,等. 基于自适应功率控制的光伏高渗透率配电网过电压研究[J]. 电力学报,2023,38(5):382-388.
- [14] 王州龙,张楠. 高速铁路高架段信号电缆雷电感应过电压计算研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(12):284-292.
- [15] 史映萍,尹纯亚,李凤婷,等. 送端系统故障下考虑有功无功交互影响的暂态过电压机理及控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(21):117-128.
- [16] 王鋈鑫. 不平衡电网电压下抑制MMC子模块电容过电压的控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2023.
- [17] 郑旭,关钦月,徐敬友,等. 考虑分布式能源集群暂态过电压抑制的交直流混联电网无功优化方法[J]. 可再生能源,2023,41(8):1089-1094.
- [18] 韩焦,钟高跃,邹丰,等. 磁控型可控并联电抗器控制绕组过电压保护研究[J]. 变压器,2024,61(5):35-41.
- [19] 徐华,周路遥,宋金根,等. 不同安装方式下分布式潮流控制器的过电压水平分析[J]. 浙江电力,2023,42(1):79-88.
- [20] 张起瑞,辛超山,李凤婷,等. 多直流协调的新能源送端地区暂态过电压抑制策略[J]. 电力工程技术,2023,42(1):98-106.
- [21] 刘其辉,闫佳颖,吴勇,等. 计及锁相误差的双馈风电并网系统暂态过电压特性与抑制[J]. 电力系统自动化,2023,47(11):165-173.
- [22] 林圣,兰菲燕,刘健,等. 高压直流输电送端电网暂态过电压机理与抑制策略综述[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(6):3-16.
- [23] 赖庆春. 直流输电工程换流站内部暂态过电压抑制方法[J]. 今日自动化,2023(12):44-46.
- [24] 易忠山,李凤婷,尹纯亚,等. 直流闭锁下的多馈出直流外送系统无功分布与暂态过电压计算方法[J]. 电网与清洁能源,2024,40(12):10-17.

收稿日期:2025-04-20