

基于新能源波动的无功电压控制限值自适应整定方法的研究

姜攀 吴玮 余仕高 熊子恒 郭丁丁

国网江西省电力有限公司贵溪市供电分公司 江西 贵溪 335400

【摘要】：随着新能源装机比例的快速提升，电力系统中新能源输出的波动性、随机性和间歇性给无功电压控制带来了严峻挑战。传统无功电压控制方法依赖静态模型与定值设定，难以适应新能源出力的动态变化，易导致电压越限、无功资源浪费等问题。为此，提出一种考虑新能源波动的无功电压控制限值自适应整定方法。该方法通过构建多节点电压与可控新能源无功注入的联合状态向量，建立逐节点更新的状态转移关系，结合数据驱动的饱和抑制规则优化预测精度；基于参考电压偏差与物理上下界构建初始协方差矩阵，通过状态预测、协方差传播、增益校正完成后验状态估计；利用电压与无功的灵敏度分析生成无功调整向量，最终通过边界控制整定各单元无功上限。仿真与实际应用验证表明，该方法能够动态适应新能源波动，提升电压控制精度与无功资源利用率，增强电力系统运行稳定性。

【关键词】：新能源波动；无功电压控制；自适应整定；状态估计；灵敏度分析；边界控制

DOI:10.12417/3083-5526.25.03.011

1 引言

1.1 研究背景

全球能源转型进程中，新能源（风电、光伏、水电等）的大规模并网已成为趋势。以江西电网为例，其新能源总装机容量已超过 3200 万千瓦，分布式光伏、水电及风电资源的广泛接入显著提升了系统运行复杂性。新能源出力具有显著的波动性、随机性和间歇性，在水资源丰富期、分布式光伏大发时段及负荷低谷期，局部区域频繁出现 35kV 及以下电压偏高现象。由于 220kV 及以下电网电抗器配置不足，传统物理无功吸收手段难以快速有效缓解此类电压问题。

1.2 现有技术问题

当前电力系统无功电压调节主要依赖火电厂进相能力、SVG 等无功补偿设备及变压器分接头调节，常规自动电压控制（AVC）系统基于静态潮流分析和分区分级定值设定。在高比例新能源场景下，现有技术存在以下突出问题：

难以适应新能源出力的实时波动，无功调节资源（如光伏逆变器、风电机组）的调节能力未被充分利用，导致部分区域电压长期越限而部分资源闲置；

依赖稳态模型与静态定值，无法反映短时间尺度下的动态电压演变，对负荷剧烈变化、光伏出力大幅波动等复杂场景缺乏鲁棒的定值优化手段；

采用经验法或线下仿真进行定值整定，调整周期长，响应滞后，极端工况下易引发电压越限甚至电网安全稳定问题。

1.3 研究目的与意义

本文提出基于考虑新能源波动的无功电压控制限值自适应整定方法，旨在通过分布式状态量建模、短期电压趋势预测、

数据驱动抑制规则及灵敏度自适应校正，实现无功电压调节上限的智能化、动态优化。该方法能够充分利用电网多节点电压与可控新能源无功的历史及实时观测数据，提升电压控制对新能源波动的适应性，提高无功资源利用效率，保障电力系统安全稳定运行，为高比例新能源接入电网的无功电压控制提供技术支撑。

2 方法原理与步骤

2.1 总体框架

本方法的核心思路是通过联合状态建模、动态预测、状态估计、灵敏度分析与边界控制的闭环流程，实现无功电压控制限值的自适应整定。总体流程如图 1 所示，包括 8 个关键步骤：联合状态向量构建、状态转移关系建立、初始协方差矩阵设置、观测模型构建、状态预测与协方差传播、状态校正、无功调整量求解、无功上限整定与边界控制。

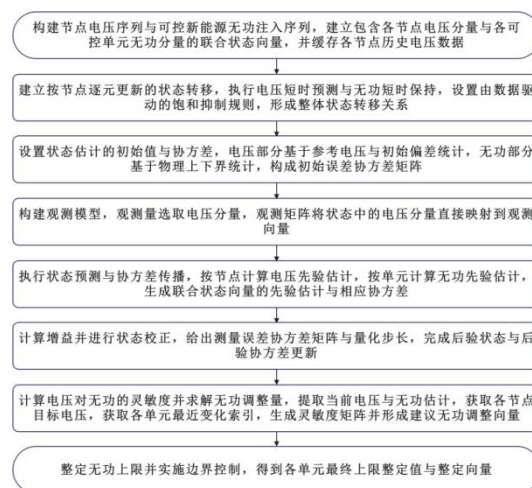


图 1 流程图示意图

2.2 状态转移关系建立

建立按节点逐元更新的状态转移,执行电压短时预测与无功短时保持,设置由数据驱动的饱和抑制规则,形成整体状态转移关系包括:

- (1) 对每个节点执行电压短时预测,预测值由当前电压与本节点近期电压变化比得到。
- (2) 计算本节点局部变化比时,按最近三次电压测量的增量关系生成变化比,当测量不足或分母为零时设置为零。
- (3) 执行由数据驱动的饱和抑制,根据历史增量幅值与量化分辨率给出幅度上界,按符号保持方向并按最小值限制幅度。
- (4) 在短时间尺度内保持各电站无功注入不变,作为下一时刻无功预测值。
- (5) 合并各节点与各单元的更新,形成整体状态转移关系,输入为上一时刻状态,输出为下一时刻状态。

2.3 初始协方差矩阵设置

设置状态估计的初始值与协方差,电压部分基于参考电压与初始偏差统计,无功部分基于物理上下界统计,构成初始误差协方差矩阵包括:

- (1) 在系统启动时,将联合状态各分量的初始估计设置为首次采集值。
- (2) 构建对角块形式的初始误差协方差矩阵,电压部分依据各节点参考电压与初始偏差统计给出方差,无功部分依据各单元物理上下界的半幅统计给出方差。

2.4 观测模型构建

构建观测模型,观测量选取电压分量,观测矩阵将状态中的电压分量直接映射到观测向量包括:

- (1) 在每次采样时刻,构建观测向量,观测分量为各节点电压测量值。
- (2) 设定观测矩阵,将联合状态中的电压分量直接映射到观测向量,非电压分量不参与映射。
- (3) 在每一采样时刻 t_n ,可观测变量为电压分量 $V_k(t_n)$,令观测向量得第 k 个分量 $y_k(t_n) = V_k(t_n)$, $k = 1, \dots, K$,并将观测向量组成为向量: $y(t_n) = [y_1(t_n), \dots, y_K(t_n)]^T = [V_1(t_n), \dots, V_K(t_n)]^T$;其中, $y(t_n)$ 为在时刻 t_n 的观测向量。
- (4) 构建观测函数为恒等映射,构造观测矩阵 $H = [I_K \ 0_{K \times N}]$;其中, $0_{K \times N}$ 为 $K \times N$ 维零矩阵;观测矩阵 H 将状态 $x(t_n)$ 的前 K 个电压分量直接映射到观测。

2.5 状态预测与协方差传播

执行状态预测与协方差传播,按节点计算电压先验估计,按单元计算无功先验估计,生成联合状态向量的先验估计与相

应协方差包括:

- (1) 按节点计算电压先验估计,按单元计算无功先验估计,拼接形成联合状态向量的先验估计。
- (2) 构建状态函数关于状态的雅可比结构:电压对应对角项为一加局部变化比,无功对应对角项为一,其余项为零。
- (3) 按雅可比与上一时刻后验协方差计算先验协方差,过程噪声协方差设为零矩阵。

2.6 状态矫正

计算增益并进行状态校正,给出测量误差协方差矩阵与量化步长,完成后验状态与后验协方差更新包括:

- (1) 设置测量误差协方差矩阵,单通道测量方差按电压量化步长构造,量化步长取零点一千伏。
- (2) 按先验协方差与观测矩阵计算增益矩阵。
- (3) 用增益矩阵修正先验状态得到后验状态,按标准格式修正协方差得到后验协方差。

2.7 无功调整量求解

计算电压对无功的灵敏度并求解无功调整量,提取当前电压与无功估计,获取各节点目标电压,获取各单元最近变化索引,生成灵敏度矩阵并形成建议无功调整向量包括:

- (1) 从后验状态中分别获取各节点电压估计与各单元无功估计,计算各节点目标电压与估计电压的偏差序列。
- (2) 为每个无功单元查找最近一次无功发生变化的离散索引,若不存在则标记为空。
- (3) 按当前与历史的电压、无功变化关系设置灵敏度矩阵元素,当分母为零或索引不存在时置零。

- (4) 构建电压偏差列向量与灵敏度矩阵,在可逆时求得建议无功调整向量,当灵敏度矩阵不可逆时输出零向量。

2.8 无功上限整定与边界控制

整定无功上限并实施边界控制,得到各单元最终上限整定值与整定向量包括:

- (1) 对每个无功单元,按当前无功估计和建议无功调整量生成未截断的上限整定值。
- (2) 执行边界截断:当未截断值低于物理下界时取下界,高于物理上界时取上界,处于范围内时保持未截断值。
- (3) 汇总各单元最终上限整定值,输出整定向量。

3 优势分析

(1) 多维联合建模

将多节点电压与多新能源无功注入纳入统一联合状态向量,配套历史电压缓存机制,克服了传统孤立观测模式的局限性,能够反映各节点与单元间的交互影响,为动态分析提供全

面数据支撑。

(2) 自适应预测与抑制

采用逐节点差分的状态转移方式，结合数据驱动的饱和抑制规则，动态限制电压变化率，避免噪声干扰与极端突变导致的预测失真，兼顾电压响应灵敏度与安全裕度。

(3) 精准状态估计

初始协方差矩阵采用分块化设定，电压部分基于参考电压偏差统计，无功部分基于物理上下界统计，提升了状态估计的可信度与物理贴合度；观测模型采用直接映射设计，减少映射不确定性，提高数据处理效率。

(4) 实时灵敏度调整

通过追溯各单元最近变化索引，实时构建电压对无功的灵敏度矩阵，克服了传统方法中灵敏度系数固定的局限，能够快速反映系统运行状态变化，提升无功分配的科学与实时性。

(5) 动态边界控制

依据实时状态为各单元量身定制无功上限，通过物理边界截断确保限值安全性，最大限度释放调节能力，实现电网安全、灵活与高效的协同调控。

3 结论

针对高比例新能源接入下电力系统无功电压控制面临的波动适应能力不足、定值静态僵化等问题，本文提出基于考虑新能源波动的无功电压控制限值自适应整定方法。该方法通过联合状态建模、动态预测、卡尔曼滤波状态估计、灵敏度分析与边界控制的闭环流程，实现了无功电压控制限值的智能化、动态优化。方法能够充分利用实时与历史观测数据，自适应跟踪新能源出力波动，提升电压控制精度与无功资源利用效率，有效缓解电压越限问题。未来研究可进一步结合电网拓扑结构优化灵敏度矩阵计算，并开展大规模电网仿真与现场试验，验证方法在复杂场景下的适用性与鲁棒性。

参考文献：

- [1] 张宇浩. 风力发电机励磁变换器的自适应模糊控制研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2009.
- [2] 李宏伟. 前端调速式风电机组并网运行自适应预测控制研究[D]. 兰州交通大学,2020.
- [3] 徐宏璐. STATCOM/BESS 接入新能源并网系统的协调控制策略研究[D]. 华北电力大学,2020.
- [4] 顾一晨. 面向风光火耦合系统的暂态节点脆弱性辨识及无功电压紧急控制研究[D]. 吉林:东北电力大学,2024.
- [5] 苏文栋. 基于 Koopman 算子的新能源电网潮流建模及电压协调优化控制[D]. 吉林:东北电力大学,2024.
- [6] 邓寅曦. 基于虚拟同步发电机的新能源微电网频率优化控制[D]. 河南:河南理工大学,2023.
- [7] 谢嫦嫦. 考虑功率预测的风电场群无功分层优化控制策略[D]. 江苏:东南大学,2022.