

Kestabilan tegangan merupakan aspek krusial dalam operasi sistem tenaga listrik modern yang semakin kompleks. Pemanfaatan PMU dalam WAMS memungkinkan pemantauan kondisi sistem secara *real-time*. Namun, keandalan penilaian kestabilan sering kali terganggu oleh permasalahan kualitas data, khususnya hilangnya data pengukuran akibat *block packet loss* pada infrastruktur komunikasi. Ketidaklengkapan data ini dapat menyebabkan kesalahan fatal dalam klasifikasi kondisi keamanan sistem serta kegagalan dalam mendeteksi lokasi *critical bus* penyebab ketidakstabilan.

Penelitian ini mengusulkan pendekatan berbasis data (*data-driven*) dengan model hybrid yang menggabungkan TCN dan SVM. Metode TCN diterapkan sebagai model rekonstruksi untuk memulihkan data PMU yang hilang dengan memanfaatkan korelasi temporal jangka panjang (*long-term dependencies*). Selanjutnya, data hasil rekonstruksi digunakan sebagai input bagi model SVM untuk melakukan dua tugas utama: mengklasifikasikan status kestabilan tegangan jangka pendek dan mengidentifikasi *critical bus*. Validasi metode dilakukan menggunakan sistem uji standar IEEE 14-Bus dengan tingkat kehilangan data dan observabilitas sebesar 20%.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa model TCN mampu merekonstruksi data tegangan yang hilang dengan presisi tinggi, menghasilkan rata-rata MAPE di bawah 2%. Integrasi metode TCN-SVM terbukti mampu memulihkan kinerja deteksi secara signifikan. Pada skenario sistem penuh, penggunaan data hasil rekonstruksi berhasil meningkatkan nilai *Recall* deteksi ketidakstabilan dari 58,99% (saat data hilang) menjadi 94,64%. Pada skenario observabilitas terbatas (3 bus), metode ini mampu memulihkan *Recall* dari titik kritis 29,87% menjadi 83,91%. Selain itu, kemampuan deteksi lokasi *critical bus* juga berhasil dipulihkan dari kegagalan total (0%) menjadi tingkat deteksi di atas 93% untuk bus yang paling terdampak. Penelitian ini menyimpulkan bahwa metode TCN-SVM menawarkan solusi yang tangguh (*robust*) untuk pemantauan kestabilan tegangan di tengah ketidakpastian infrastruktur komunikasi.

Kata kunci—Kestabilan Tegangan, *Phasor Measurement Unit* (PMU), *Missing Data*, *Temporal Convolutional Network* (TCN), *Support Vector Machine* (SVM), Deteksi *Critical Bus*.

ABSTRACT

Voltage stability is a crucial aspect of modern power system operations. The utilization of PMU in WAMS enables real-time monitoring of system conditions. However, the reliability of stability assessment is often compromised by data quality issues, specifically missing measurement data due to block packet loss in communication infrastructure. Such data incompleteness can lead to fatal errors in classifying system security states and failure to identify critical buses causing instability.

This research proposes a data-driven approach using a hybrid model combining TCN and SVM. The TCN method is applied as a reconstruction model to recover missing PMU data by leveraging long-term temporal dependencies. Subsequently, the reconstructed data serves as input for the SVM model to perform two primary tasks: classifying short-term voltage stability status and identifying critical buses. The method is validated using the standard IEEE 14-Bus test system under a 20% data loss scenario.

The results demonstrate that the TCN model is capable of reconstructing missing voltage data with high precision, yielding an average MAPE below 2%. The integration of the TCN-SVM method is proven to significantly restore detection performance. In the full system scenario, using reconstructed data successfully improved the instability detection Recall from 58.99% (under missing data conditions) to 94.64%. In the limited observability scenario (3 buses), the method restored the Recall from a critical 29.87% to 83.91%. Furthermore, the critical bus localization capability was successfully recovered from total failure (0%) to detection rates above 93% for the most affected buses. This study concludes that the TCN-SVM method offers a robust solution for voltage stability monitoring amidst communication infrastructure uncertainties.

Keywords—Voltage Stability, Phasor Measurement Unit (PMU), Missing Data, Temporal Convolutional Network (TCN), Support Vector Machine (SVM), Critical Bus Detection.