

PENENTUAN LOKASI PENEMPATAN TCSC PADA SISTEM KELISTRIKAN SULAWESI SELATAN DAN BARAT MENGGUNAKAN INDEKS SENSITIVITAS

Nur Vidya Ramadhani¹, Rini Nur Hasanah², Hadi Suyono³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya

Jalan MT Haryono 167 Malang 65145, Telp/Fax +62-341-554166

Email: vhidyardamadhany@gmail.com, rini.hasanah@ub.ac.id, hadis@ub.ac.id

Info Artikel

Histori Artikel:

Diterima Des 17, 2021

Direvisi Jan 01, 2022

Disetujui Apr 18, 2022

ABSTRACT

The transmission line that functions to distribute energy from the generating center to the load center must function efficiently. However, the extensive network may cause the line operation to be inefficient. The occurrence of power losses and voltage drop in the system is inevitable. Some efforts are needed to effectively utilize the available power system capacity; one possibility is by installing new Flexible AC Transmission (FACT) devices such as Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC). In this paper, the Sensitivity Index method is applied to optimize the TCSC utilization. The power flow analysis was carried out on the South and West Sulawesi electricity system using the Power System Analysis Toolbox (PSAT) program. Based on the data analysis that has been done, it was found that the most sensitive line is the line Pngkep70kV–Mndai. After the installation of the TCSC device on the sensitive line, there was a slight increase in power losses, namely from 5.08 p.u to 5.11 p.u and an increase in the system voltage stability, which was from 41.37 p.u to 41.52 p.u., being compared to before the TCSC installation. It can be concluded that the installation of TCSC provides a positive performance improvement on the electricity system of South and West Sulawesi.

Keywords: Load Flow Analysis, TCSC, Sensitivity Index.

ABSTRAK

Saluran transmisi yang berfungsi menyalurkan energi dari pusat pembangkit ke pusat beban harus berfungsi secara efisien. Akan tetapi, jaringan yang luas memungkinkan pengoperasian saluran menjadi tidak efisien. Hal ini memungkinkan terjadinya rugi-rugi daya dan drop tegangan pada sistem. Oleh karena itu, dibutuhkan upaya untuk memanfaatkan kapasitas sistem daya yang tersedia secara efektif, yang salah satunya dengan memasang perangkat Flexible AC Transmission (FACT) baru seperti Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC). Pada penelitian ini metode Indeks Sensitivitas digunakan untuk mengoptimalkan penggunaan TCSC. Analisis aliran daya ini dilakukan pada sistem kelistrikan Sulawesi Selatan dan Barat menggunakan program Power System Analysis Toolbox (PSAT). Berdasarkan analisis data yang telah dilakukan ditemukan bahwa saluran yang paling sensitif adalah saluran Pngkep70kV–Mndai. Setelah pemasangan perangkat TCSC pada saluran yang sensitif tersebut terjadi sedikit kenaikan rugi-rugi daya yaitu dari 5.08 p.u menjadi 5.11 p.u dan peningkatan stabilitas tegangan pada sistem dibandingkan sebelum pemasangan TCSC yaitu dari 41.37 p.u menjadi 41.52 p.u. Dapat disimpulkan bahwa pemasangan TCSC memberikan kinerja perbaikan positif pada sistem kelistrikan Sulawesi Selatan dan Barat.

Kata Kunci: Analisis Aliran Daya, TCSC, Indeks Sensitivitas.

Penulis Korespondensi:

Rini Nur Hasanah,,

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik,

Universitas Brawijaya,

Jl. Mayjend Haryono No. 167 - Malang.

Email: rini.hasanah@ub.ac.id



1. PENDAHULUAN

Salah satu bagian terpenting dalam sistem tenaga listrik adalah saluran transmisi yang berfungsi menyalurkan energi dari pusat pembangkit ke pusat beban. Saluran transmisi yang berfungsi menyalurkan energi tersebut harus beroperasi secara efisien. Akan tetapi, jaringan yang luas biasanya menjadi penyebab saluran transmisi menjadi kurang efisien karena adanya rugi-rugi daya. Selain itu, jaringan yang luas juga memungkinkan terjadinya drop tegangan pada sistem [1].

Sistem kelistrikan Sulawesi Selatan dan Barat dengan luas wilayah sebesar 63.504 km² merupakan sistem kelistrikan dengan jaringan yang cukup luas sehingga memungkinkan terjadinya berbagai masalah ketidakefisienan. Terjadinya rugi-rugi daya dan drop tegangan pada sistem kelistrikan dengan jaringan yang luas ini dapat dihindari dengan penambahan alat, misalnya perangkat FACTS (*Flexible AC Transmission System*) [2]. Perangkat FACTS memiliki kemampuan mengontrol berbagai parameter listrik pada jaringan transmisi. Perangkat FACTS memberikan solusi teknis yang telah terbukti untuk masalah stabilitas tegangan, terutama karena meningkatnya kebutuhan akan respon cepat untuk kualitas daya dan stabilitas tegangan [3].

Salah satu perangkat FACTS dengan pengontrolan seri adalah *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC). Manfaat utama dari TCSC adalah kemampuannya untuk mengontrol aliran daya pada saluran yang diinginkan dan secara cepat memodulasi impedansi seri saluran dalam menanggapi dinamika sistem tenaga [4].

Penempatan yang optimal dari perangkat pengontrol ini sangat penting karena kelebihan daya reaktif dalam sistem tenaga dapat menyebabkan terjadinya pemanasan yang diakibatkan oleh ketidakstabilan pasokan tegangan.

Pada berbagai literatur telah diusulkan banyak cara pendekatan untuk mengoptimalkan lokasi dan pengaturan parameter perangkat FACTS dari berbagai sudut pandang [5]. Di antaranya adalah dengan menggunakan Indeks Sensitivitas.

Penggunaan Indeks Sensitivitas yang merujuk pada rugi-rugi daya saluran telah dikembangkan untuk penempatan kapasitor secara seri guna mereduksi rugi-rugi daya reaktif [6]. Oleh karena itu dalam penelitian ini metode tersebut digunakan untuk menentukan lokasi terbaik pemasangan perangkat TCSC, dengan kriteria sebagai berikut [7]:

1. TCSC ditempatkan pada jaringan yang memiliki Indeks Sensitivitas yang paling positif.
2. TCSC tidak boleh ditempatkan pada jaringan yang memiliki bus generator meskipun sensitivitasnya paling tinggi.
3. Penting untuk menentukan lokasi penempatan perangkat ini karena biayanya yang tinggi [7]. Saluran yang memiliki sensitivitas transfer daya yang relatif tinggi sehubungan dengan perubahan reaktansi saluran dianggap sebagai lokasi terbaik pemasangan TCSC [7].

2. METODE PENELITIAN

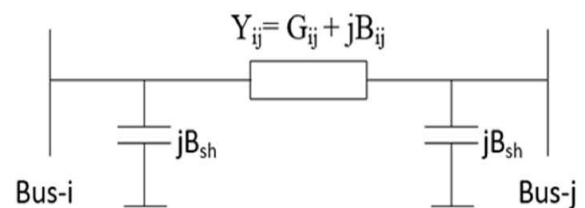
2.1. Analisis Aliran Daya

Aliran daya adalah menggambarkan keadaan tunak jaringan sistem tenaga. Studi aliran beban digunakan untuk menghitung besar sudut fase tegangan pada setiap bus, aliran daya aktif dan reaktif melalui berbagai saluran, generator, transformator dan beban dalam kondisi tunak [8].

Perangkat lunak komputer aliran beban dikembangkan pada pertengahan tahun 1950-an. Sejak itu, berbagai metode telah digunakan dalam perhitungan aliran beban. Metode iteratif yang umum digunakan adalah metode *Newton-Raphson* [8].

Pada penelitian ini analisis aliran daya dilakukan menggunakan alat bantu simulasi *Power System Analysis Toolbox* (PSAT) berdasarkan metode *Newton-Raphson*.

2.1.1 Tanpa TCSC



Gambar 1. Model Saluran Transmisi

Gambar 1 menunjukkan saluran transmisi sederhana yang diwakili dengan parameter setara yang terhubung antara bus-i dan bus-j. Aliran daya aktif dan reaktif dari bus-i ke bus-j dijabarkan sebagai berikut [9]:

$$P_{ij} = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j [G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}] \quad (1)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (B_{ij} + B_{sh}) - V_i V_j [G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}] \quad (2)$$

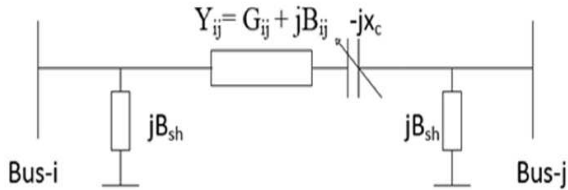
dengan $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$.

Aliran daya nyata dan daya reaktif dari bus-j ke bus-i dijelaskan berikut [9]:

$$P_{ji} = V_j^2 G_{ij} - V_i V_j [G_{ij} \cos \delta_{ij} - B_{ij} \sin \delta_{ij}] \quad (3)$$

$$Q_{ji} = -V_j^2 (B_{ij} + B_{sh}) + V_i V_j [G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}] \quad (4)$$

2.1.2 Dengan TCSC



Gambar 2. Model Saluran Transmisi dengan TCSC

Gambar 2 menunjukkan model saluran transmisi dengan TCSC terhubung antara bus-i dan bus-j. TCSC dapat digambarkan sebagai kapasitansi statis dengan nilai $-jX_c$ [9].

Aliran daya aktif dan daya reaktif dari bus-i dan bus-j dan dari bus-j ke bus-i dari saluran yang memiliki impedansi seri dan reaktansi seri dapat direpresentasikan sebagai berikut [9]:

$$P'_{ij} = V_i^2 G'_{ij} - V_i V_j [G'_{ij} \cos \delta_{ij} + B'_{ij} \sin \delta_{ij}] \quad (5)$$

$$Q'_{ij} = -V_j^2 (B'_{ij} + B_{sh}) - V_i V_j [G'_{ij} \sin \delta_{ij} - B'_{ij} \cos \delta_{ij}] \quad (6)$$

$$P'_{ij} = V_i^2 G'_{ij} - V_i V_j [G'_{ij} \cos \delta_{ij} - B'_{ij} \sin \delta_{ij}] \quad (7)$$

$$Q'_{ij} = -V_j^2 (B'_{ij} + B_{sh}) - V_i V_j [G'_{ij} \sin \delta_{ij} + B'_{ij} \cos \delta_{ij}] \quad (8)$$

dengan,

$$G'_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + (x_{ij} - x_c)^2} \quad (9)$$

$$B'_{ij} = \frac{-(x_{ij} - x_c)}{r_{ij}^2 + ((x_{ij} - x_c)^2)^2} \quad (10)$$

Injeksi daya aktif dan reaktif pada saat TCSC terpasang pada bus-i dijabarkan sebagai berikut [9]:

$$P_{iinj}^{TCSC} = G_{ii} V_i^2 + (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) V_i V_j \quad (11)$$

$$Q_{iinj}^{TCSC} = -B_{ii} V_i^2 + (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) V_i V_j \quad (12)$$

Injeksi daya aktif dan reaktif pada saat TCSC terpasang pada bus-j dijabarkan sebagai berikut

$$P_{jinj}^{TCSC} = G_{jj} V_j^2 + (G_{ji} \cos \delta_{ji} + B_{ji} \sin \delta_{ji}) V_i V_j \quad (13)$$

$$Q_{jinj}^{TCSC} = -B_{jj} V_j^2 + (G_{ji} \sin \delta_{ji} + B_{ji} \cos \delta_{ji}) V_i V_j \quad (14)$$

dengan,

$$G_{ji} = G_{ij} = -G_{jj} = -G_{ii} = \frac{X_c r_{ij} (-2x_{ij} + X_c)}{(r_{ij}^2 + X_{ij}^2)(r_{ij}^2 + (X_{ij} - X_c)^2)} \quad (15)$$

$$B_{ji} = B_{ij} = -B_{jj} = -B_{ii} = \frac{-X_c (r_{ij}^2 - X_{ij}(X_{ij} - X_c))}{(r_{ij}^2 + X_{ij}^2)(r_{ij}^2 + (X_{ij} - X_c)^2)} \quad (16)$$

2.2. Indeks Sensitivitas

Analisis sensitivitas adalah salah satu metode efisien yang cocok digunakan untuk mendapatkan lokasi TCSC yang optimal dalam jaringan yang kompleks. Pada dasarnya metode ini menganalisis sensitivitas semua saluran yang ada [10].

Teknik berbasis Indeks Sensitivitas digunakan untuk mengidentifikasi saluran yang paling sensitif untuk mengurangi rugi-rugi daya nyata dan rugi-rugi daya reaktif guna meningkatkan stabilitas serta mengintensifkan profil tegangan dengan menempatkan perangkat FACTS.

Indeks sensitivitas rugi-rugi daya reaktif dianggap sebagai turunan parsial dari hilangnya daya reaktif saluran transmisi m sehubungan dengan reaktansi kapasitif terkompensasi (X_{cm}) dari saluran transmisi:

$$b_m = \frac{\partial Q_{Lm}^n}{\partial x_{cm}} = (V_i^2 + V_j^2 2V_i V_j \cos \delta_{ij}) \frac{r_{ij}^2 - x_{ij}^2}{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)^2} \quad (17)$$

TCSC dapat ditempatkan pada saluran yang paling sensitif. Kriteria tersebut dapat digunakan untuk menentukan penempatan yang optimal. Menurut indeks sensitivitas rugi-rugi daya reaktif, TCSC harus ditempatkan pada saluran yang memiliki indeks sensitivitas rugi-rugi daya reaktif yang paling positif [5].

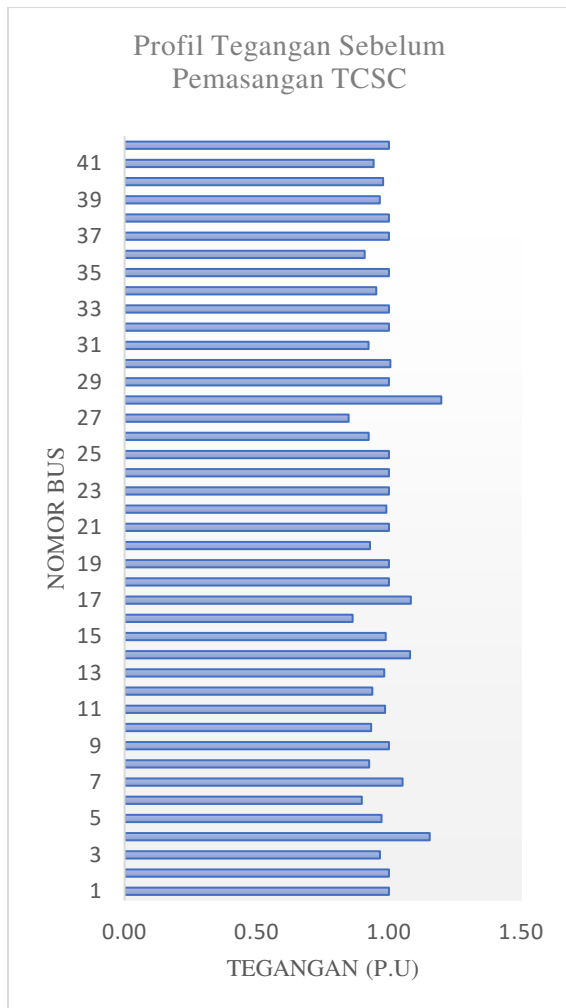
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Hasil Perhitungan dan Simulasi

Teknik penempatan TCSC menggunakan metode Indeks Sensitivitas ini diterapkan pada sistem kelistrikan Sulawesi Selatan dan Barat yang terdiri dari pembangkit yang terhubung secara interkoneksi menggunakan jaringan 150kV dan 70kV. Jumlah gardu induk eksisting Sulawesi Selatan dan Barat adalah 51 buah dengan kapasitas 1.758

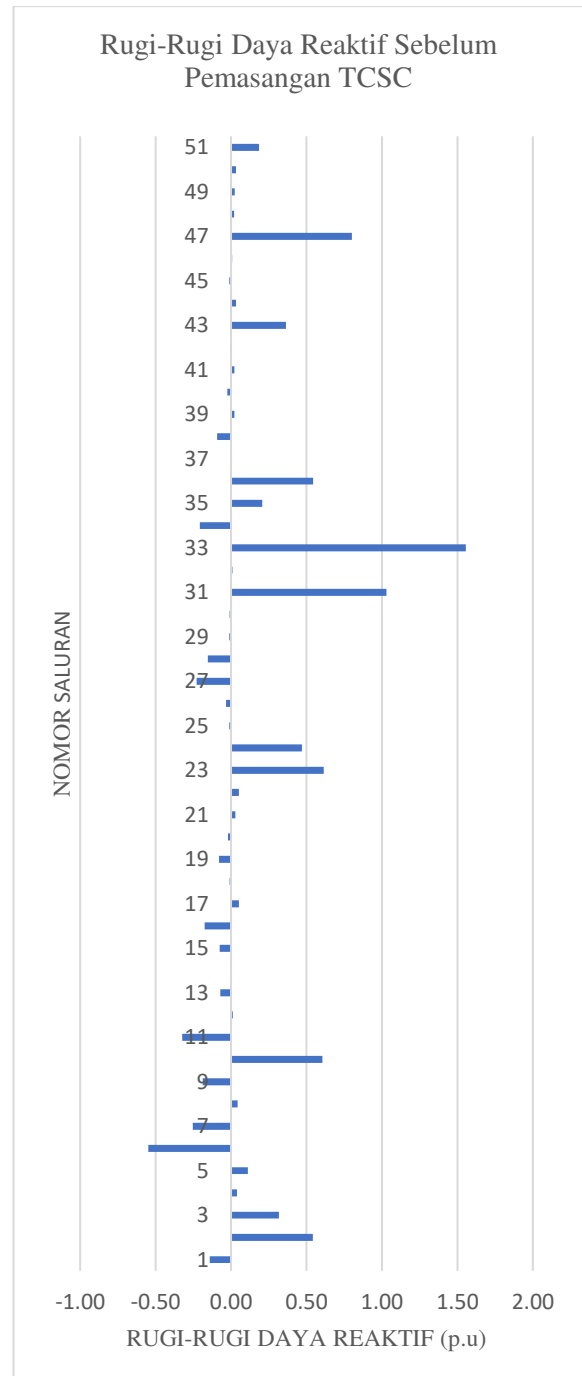
MVA. Kajian sistem jaringan dilakukan menggunakan alat bantu simulasi MATLAB PSAT.

Analisis awal aliran daya pada sistem dilakukan menggunakan Metode *Newton-Raphson*. Analisis aliran daya dilanjutkan dengan perhitungan nilai Indeks Sensitivitas pada setiap saluran. Saluran dengan nilai indeks paling positif merupakan saluran yang paling sensitif. Berdasarkan nilai indeks tersebut, lokasi penempatan TCSC sudah dapat ditentukan.



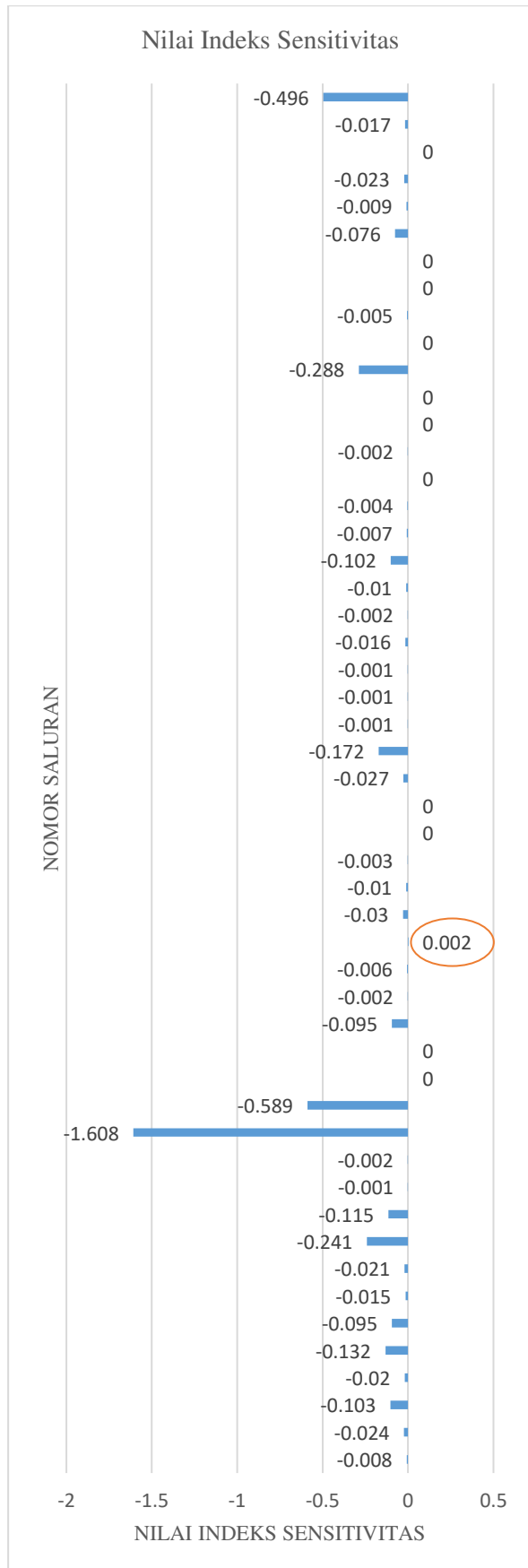
Gambar 3 Grafik Profil Tegangan Sebelum Pemasangan TCSC

Berdasarkan Gambar 3, analisis aliran daya pada sistem kelistrikan Sulawesi Selatan dan Barat sebelum pemasangan TCSC menghasilkan nilai profil tegangan sebesar 41.37 p.u.



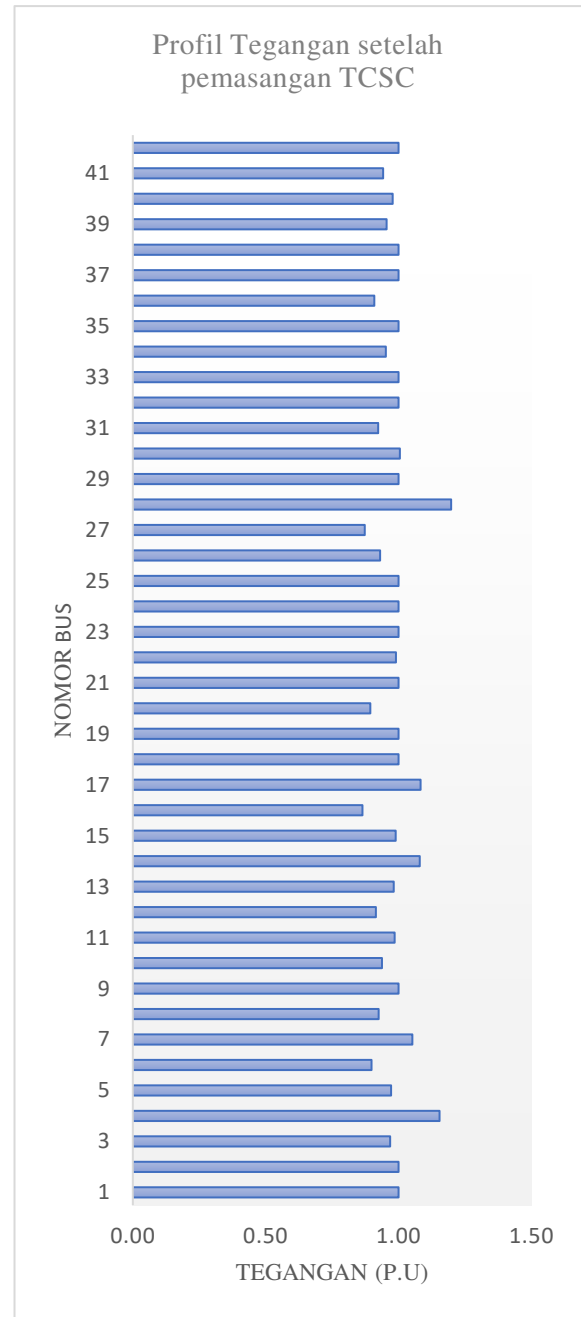
Gambar 4 Grafik Rugi-rugi Daya Reaktif Sebelum Pemasangan TCSC

Berdasarkan Gambar 4, analisis aliran daya pada sistem kelistrikan Sulawesi Selatan dan Barat sebelum pemasangan TCSC menunjukkan adanya nilai rugi-rugi daya reaktif sebesar 5.08 p.u.



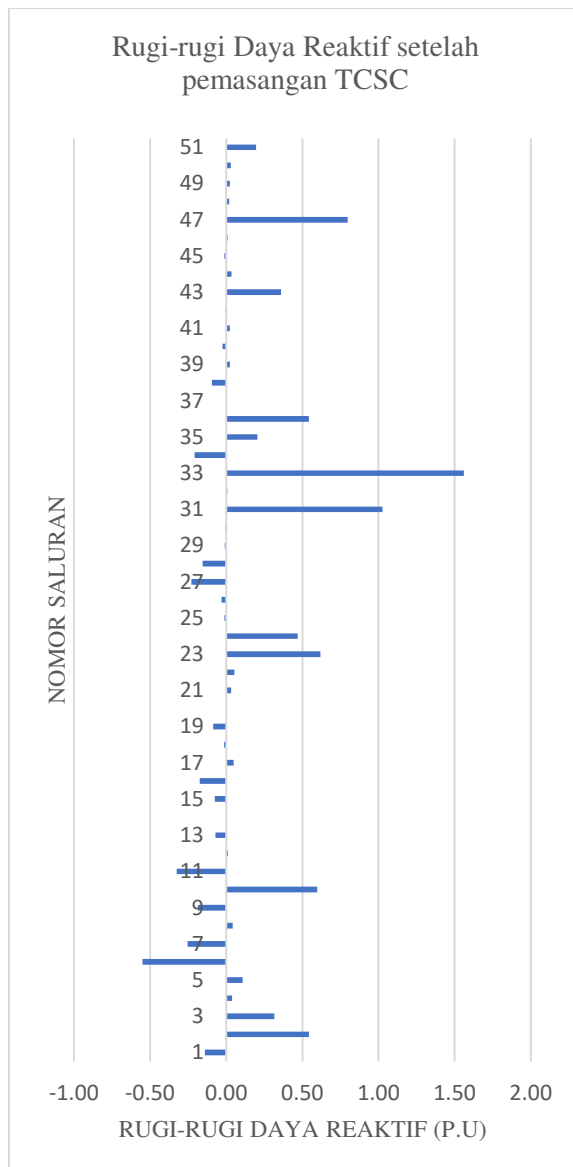
Gambar 5 Grafik Nilai Indeks Sensitivitas Saluran

Berdasarkan Gambar 5, nilai Indeks Sensitivitas rugi-rugi daya reaktif (b_m) yang bernilai paling positif berada pada saluran Pnkep70kV–Mndai dengan nilai Indeks Sensitivitas adalah 0.002. Sehubungan dengan hasil yang diperoleh, maka saluran ini merupakan saluran yang paling sensitif dan optimal untuk pemasangan TCSC.



Gambar 6 Grafik Profil Tegangan Setelah Pemasangan TCSC

Berdasarkan Gambar 6, nilai profil tegangan pada saluran Pnkep70kV-Mndai setelah pemasangan TCSC adalah sebesar 41.52 p.u.



Gambar 7 Grafik Rugi-rugi Daya Reaktif Setelah Pemasangan TCSC

Dari Gambar 7 didapatkan nilai rugi-rugi daya reaktif pada saluran Pnkep70kV-Mndai setelah pemasangan TCSC sebesar 5.11 p.u.

Setelah TCSC ditempatkan pada saluran Pnkep70kV-Mndai, didapatkan peningkatan nilai profil tegangan dan rugi-rugi daya reaktif dari sebelum pemasangan. Adapun nilai kenaikan profil tegangannya adalah dari 41.37 p.u menjadi 41.52 p.u dan rugi-rugi daya reaktif dari 5,08 p.u menjadi 5.11 p.u.

3.2 Analisis Hasil Perhitungan dan Simulasi

Dalam studi ini, sistem kelistrikan Sulawesi Selatan dan Barat telah dipelajari untuk mengetahui hasil dari metode yang diusulkan dalam penempatan TCSC. Berdasarkan [7], penentuan lokasi

terbaik pemasangan TCSC adalah TCSC ditempatkan pada saluran yang memiliki Indeks Sensitivitas yang paling positif. TCSC juga tidak boleh ditempatkan pada saluran yang memiliki bus generator meskipun memiliki nilai indeks sensitivitas paling tinggi. Penentuan lokasi penempatan perangkat ini sangat penting karena biayanya sangat tinggi. Dari hasil yang didapatkan pada Gambar 3 dan 4 diketahui bahwa hasil analisis aliran daya pada sistem sebelum pemasangan TCSC adalah nilai profil tegangan sebesar 41.37 p.u dan rugi-rugi daya reaktif sebesar 5.08 p.u.

Nilai Indeks Sensitivitas ditunjukkan pada gambar 5, yang dihitung menggunakan persamaan yang telah dibahas bagian-bagian sebelumnya. Berdasarkan nilai Indeks Sensitivitas tersebut, saluran Pnkep70kV-Mndai merupakan saluran yang memiliki nilai indeks sensitivitas paling positif sehingga menjadi lokasi penempatan TCSC. Hasil analisis aliran daya setelah pemasangan TCSC pada saluran yang paling sensitif tersebut menunjukkan kenaikan nilai profil tegangan dari 41.37 p.u menjadi 41.52 p.u dan rugi-rugi daya reaktif dari 5.08 p.u menjadi 5.11 p.u. Hasilnya menunjukkan kenaikan profil tegangan dan sedikit peningkatan rugi-rugi daya reaktif

4. KESIMPULAN

Dari analisis data hasil penelitian ini dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Lokasi penempatan TCSC yang optimal berdasarkan metode Indeks sensitivitas ditempatkan pada saluran Pnkep70kV-Mndai.
2. Penempatan optimal TCSC yang diusulkan pada penelitian ini menghasilkan perbaikan profil tegangan dari 41.37 p.u menjadi 41.52 p.u.
3. Penempatan optimal TCSC pada penelitian ini menyebabkan kenaikan rugi-rugi daya reaktif dari 5.08 p.u menjadi 5.11 p.u.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Bakar Noorsakinah Abu and Mohd Khairunaz Mat Desa. Optimal Placement of TCSC in Transmission Network Using Sensitivity Based Methods for Multi Objective Optimization. *IEEE*. 2017: Pages. 201-206.
- [2]. Eghtedarpour Navid dan Seifi Ali Reza. Sensitivity-based Method for the Effective Location of SSSC. *Journal of Power Electronics*. 2011: Pages. 90-96.
- [3]. Nadeem Mohammad, M Zulqarnain Zeb, Kashif Imran. Optimal Sizing and Allocation

- of SVC and TCSC in Transmission Network by Combined Sensitivity Index and PSO. *IEEE*. 2019; Pages. 111-116.
- [4]. Padmini N, Pallavi Choudekar, Mehtab Fatima. Transmission Congestion Management of IEEE 24-Bus Test System by Optimal Placement of TCSC. *ICPEICES*. 2018; Pages. 44-49.
- [5]. Jadhao Chetan W, K. Vadirajacharya. Performance Improvement of Power System through Static VAR Compensator Using Sensitivity Indices Analysis Method. *International Conference on Energy System and Application*. 2015; Pages. 200-202.
- [6]. Pati S, Dahiyar R. Optimal Location of TCSC in a Large System to Optimize Load Flow: A sensitivity Based Approach. *2016 IEEE 6th International Conference on Power System (ICPS)*. 2016; 1-5.
- [7]. Malival Sunil N, Chande K.C, Parikh Rahil S. Optimal Placement of TCSC by Sensitivity Methods using PSAT. *International Journal for Scientific Research & Development (IJSRD)*. 2014; Pages. 2554-2558.
- [8]. Tien Dung Vo, Gadamir Gono, Zbigniew Leonowicz. A New Approach Newton-Raphson Load Flow Analysis in Power System Networks with STATCOM. *International Conference on Advanced Engineering Theory and Applications*. 2020; pages 88-100.
- [9]. Gad Madhura, Prachi Shinde, Prof. S.U. Kulkarni. Optimal Location of TCSC by Sensitivity Methods. *International Journal of Computational Engineering Research*. 2012; 2(6): Pages. 162-168
- [10]. Gautam K.K, Arun K.S. Tomar. Locating Facts Devices in Optimized Manner in Power System by Means of Sensitivity Analysis. *Int. Journal of Engineering Research and Application*. 2017; Pages. 71-76.