

Analisa Penerapan Static Var Compensation (SVC) Dalam Pengasutan Motor Induksi 450kw Pada Tegangan 6 KV Di Project Fasilitas Pengolahan Gas Azerbaijan

Yarnis Harun

Universitas Kristen Indonesia, Indonesia

Email: yarnis42@gmail.com

Kata Kunci

Pengasutan, Direct
On-Line (DOL),
Static Var
Compensator
(SVC), Jatuh
Tegangan, Grid

Abstrak

Pada sistem kelistrikan industri, karakteristik beban akan berpengaruh besar terhadap operasi ekonomis sistem. Pada umumnya peralatan proses industri menggunakan motor-motor listrik sebagai penggerakannya, dimana motor-motor listrik ini akan menghasilkan beban reaktif yang akan membebani jaringan dan juga sistem pembangkitan listriknya. Beban reaktif merupakan masalah kompleks pada sistem kelistrikan yang akan berpengaruh terhadap jatuh tegangan, rugi-rugi daya hingga menurunkan kualitas daya listrik. Pengasutan motor besar dalam sistem kelistrikan industri menjadi hal yang sangat penting untuk diperhatikan. Motor-motor induksi akan memerlukan arus 5-10 kali lipat lebih besar pada saat pengasutan, dan juga menghasilkan beban reaktif yang cukup besar. Pengasutan motor dapat menyebabkan drop tegangan, peralatan yang sensitive akan mengalami penurunan performa, kegagalan operasi bahkan mengakibatkan kerusakan peralatan. Beberapa sistem pengasutan telah dikembangkan, diantaranya Star-delta, Elektronis Soft-starter, Auto Transformer, Variable Speed Drive (VSD) hingga pengasutan dengan Kapasitor. Analisa ini membandingkan pengasutan motor 450kW, 6kV dengan metode direct Online (DOL) dan dengan menambahkan Static Var Compensator (SVC), dengan menggunakan bantuan software ETAP. Studi Pengasutan ini dilakukan berdasarkan kasus yang terjadi di Project Fasilitas Pengolahan Gas, Azerbaijan. Pengasutan sebenarnya menggunakan across-the-line (DOL), namun ada beberapa kendala seperti voltage drop selama durasi pengasutan dan arus yang cukup besar diperlukan dari line GRID sehingga mengganggu sistem dan juga berdampak pada gardu utama yang berada 1.3km dari lokasi Fasilitas. Hasil simulasi menunjukkan peranan SVC yang cukup signifikan, tegangan jatuh hanya di sekitar 3% dibandingkan dengan DOL 10%. Arus pengasutan yang terasa di jaringan pun hanya sekitar 150% dari arus nominalnya dibandingkan dengan DOL yang membutuhkan 560%.

Keywords

Excitation, Direct
On-Line (DOL),
Static Var
Compensator (SVC),
Voltage Drop, Grid

Abstract

In industrial electrical systems, load characteristics have a significant impact on the economic operation of the system. Generally, industrial process equipment uses electric motors as their power source, where these electric motors generate reactive loads that burden the network and the power generation system. Reactive load is a complex issue in electrical systems that can cause voltage drops, power losses, and reduced power quality. The startup of large motors in industrial electrical systems is a critical consideration. Induction motors require 5-10 times more current during startup and also generate significant reactive load. Motor starting can cause voltage drops, leading to performance degradation in sensitive equipment, operational failures, and even equipment damage. Several starting systems have been developed, including Star-Delta, Electronic Soft-Starter, Auto Transformer, Variable Speed Drive (VSD), and capacitor starting. This analysis compares the starting of a 450kW, 6kV motor using the Direct Online (DOL) method and with the addition of a Static Var Compensator (SVC), using the ETAP software. This starting study was conducted based on a case that occurred at the Gas Processing Facility Project in Azerbaijan. The actual starting method used was across-the-line (DOL), but there were several challenges, such as voltage drop during the starting duration and the need for a significant current from the grid, which disrupted the system and also affected the main substation located 1.3 km from the facility site. The simulation results showed the significant role of the SVC, with voltage drop only around

PENDAHULUAN

Sejak tahun 1970-an, kompensator var statis (SVC, Static VAR Compensator) telah digunakan terutama untuk mengurangi fluktuasi tegangan dan kedipan yang terjadi di dalam suatu sistem tenaga listrik (Chowdhury et al., 2017; Li & Zhao, 2019; Ghosh et al., 2020; Deshmukh & Patil, 2021; Wang & Lu, 2023). Saat ini, industri-industri besar khususnya pabrik baja, pertambangan dan pusat-pusat beban banyak menggunakan kompensator var statis pada instalasi tenaga listrik untuk menjaga kehandalan sistem (Zhao et al., 2019; Wang et al., 2020; Kumar et al., 2021; Khalil et al., 2022; Rahman et al., 2023).

Selain itu, kompensator var statis dipasang di lokasi yang tepat dalam sistem tenaga untuk meningkatkan kemampuan aliran daya dengan meningkatkan stabilitas tegangan sambil mempertahankan kurva tegangan yang mulus dalam kondisi sistem yang berbeda. Kompensator var statis juga dapat mengurangi osilasi daya aktif melalui modulasi amplitudo tegangan. Selain itu, sebagai perangkat menyesuaikan impedansi otomatis, perangkat ini mempunyai keuntungan tambahan yaitu membawa faktor daya sistem mendekati ke nilai yang maksimum (Lee & Kim, 2018; Ahmed et al., 2020; Roy & Jadhav, 2021; Gao et al., 2022; Singh & Sharma, 2023).

Oleh karena itu, kompensator var statis sering dipasang di dekat pusat-pusat beban besar dan berubah-ubah dengan cepat, seperti pengasutan motor-motor listrik berdaya besar, tungku busur listrik, pabrik pengelasan dengan daya besar, dan lainnya. penerapan VFD di industri rentan terhadap fluktuasi tegangan dan kedipan (Huang et al., 2018; Thakur et al., 2019; Prakash et al., 2021; Pandey et al., 2022; Ouyang et al., 2023). Selain itu, manfaat lain dari kompensator var statis meliputi: kompensasi daya yang maksimal; respons yang hampir seketika terhadap perubahan tegangan sistem; peningkatan ekonomi pelanggan; penggunaan filter shunt yang sesuai untuk menghilangkan harmonisa dan mengurangi distorsi tegangan; penyeimbang beban.

Pada sistem kelistrikan industri, keadaan beban akan berpengaruh besar terhadap operasi ekonomis sistem. Karena bebannya banyak menggunakan motor induksi, sehingga akan menyebabkan kelebihan daya reaktif pada jaringan. Daya reaktif merupakan masalah yang komplek dan penting pada sistem kelistrikan, terutama pada sistem kelistrikan di industri dimana sebagian besar bebannya merupakan motor induksi, sehingga menimbulkan masalah pada daya reaktif.

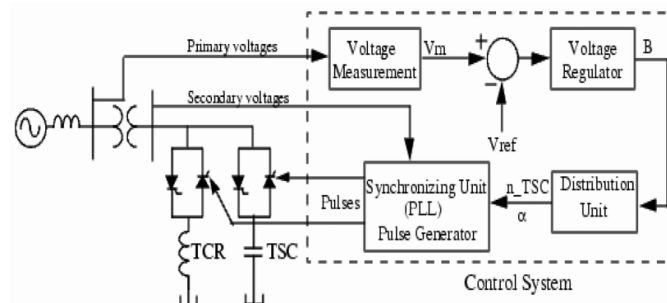
Pada penulisan paper ini akan dilakukan pembahasan tentang perbandingan parameter besaran listrik sistem pengasutan motor Induksi 3 phase 450 KW pada tegangan 6 KV dengan menggunakan kompensator var statis (SVC, Static VAR Compensator) dan dengan pengasutan motor tanpa Static VAR Compensator dengan menggunakan program ETAP untuk mengetahui sampai dimana peranan daya reaktif terhadap sistem terutama peran terhadap jatuh tegangan, rugi-rugi daya, dan kapasitas kebutuhan daya.

Static VAR Compensator (SVC) adalah perangkat elektronika daya yang disusun secara paralel untuk mengatur aliran daya dan meningkatkan stabilitas transien dari sistem jaringan. Perangkat SVC mengatur tegangan pada masing-masing terminal dengan mengatur jumlah daya reaktif yang diinjeksikan atau diserap dari sistem daya. Saat tegangan sistem rendah, SVC

membangkitkan daya reaktif (SVC Kapasitif). Saat tegangan sistem tinggi, SVC menyerap daya reaktif (SVC Induktif). Pengaturan daya reaktif ini dilakukan dengan switching bank kapasitor dan bank induktor 3 fasa yang terhubung pada sisi sekunder transformator. Kondisi on dan off kapasitor bank diatur oleh thyristor switch (Thyristor Switched Capacitor or TSC). Kondisi on dan off reaktor diatur oleh Thyristor Switch Reactor (TSR) atau Thyristor Controlled Reactor (TCR). (Siantri, 2016).

SVC merupakan salah satu jenis perangkat FACTS (Flexible AC Transmission Systems), yaitu perangkat elektronika daya untuk penyaluran sistem arus AC yang dapat digunakan secara fleksibel untuk meningkatkan kualitas penyaluran sistem aliran daya. Perangkat ini bekerja dengan mengkompensasi daya reaktif terhadap jaringan. Static VAR Compensator (SVC) menyediakan kompensasi fast-acting reactive power pada jaringan listrik tegangan tinggi. SVC merupakan bagian dari sistem peralatan AC transmisi yang fleksibel, pengatur tegangan dan penstabil sistem. Istilah “static” berdasarkan pada kenyataannya bahwa pada saat beroperasi atau melakukan perubahan kompensasi tidak ada bagian (part) SVC yang bergerak, karena proses kompensasi sepenuhnya dikontrol oleh sistem elektronika daya. (Siantri, 2016).

Kebutuhan daya reaktif pada sistem dapat dipasok oleh unit pembangkit, sistem transmisi, reaktor dan kapasitor. Karena kebutuhan daya reaktif pada sistem bervariasi yang disebabkan oleh perubahan beban, komposisi unit pembangkit yang beroperasi, perubahan konfigurasi jaringan, hal ini berdampak pada bervariasinya level tegangan yang paling besar, oleh sebab itu diperlukan sistem kompensasi daya reaktif yang dapat mengikuti perubahan tegangan. Sistem pengontrolan dan operasi dari perangkat elektronika daya SVC diterangkan dalam diagram blok dibawah ini:



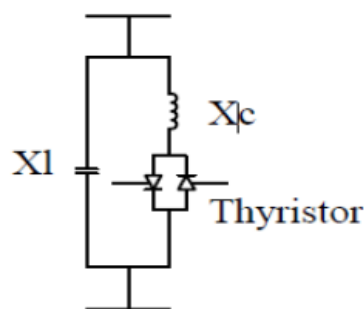
Gambar 1. Skema Single-line diagram of a SVC control system

Secara umum, SVC terhubung paralel dengan sistem penyaluran namun perangkat SVC tidak langsung terkoneksi dengan tegangan transmisi (tegangan tinggi) melainkan tegangan lebih dulu diturunkan ke level yang lebih rendah. Hal ini bertujuan untuk mengurangi ukuran dan komponen SVC yang akan dipasang. Karena untuk memikul tegangan sistem yang tinggi diperlukan sistem isolasi dan konduktor yang lebih besar sehingga diperlukan biaya yang lebih besar pula. Oleh karena itu, diperlukan trafo sebagai penurun tegangan. Di kondisi lain, misalnya industri, pemasangan secara langsung SVC dengan tegangan sistem dimungkinkan. Hal ini dikarenakan tegangan sistem yang umumnya digunakan pada industri adalah tegangan menengah (20 KV-35 KV). Jadi untuk menghemat biaya para pengguna tidak perlu membeli trafo untuk mengkonversi level tegangan dikarenakan tegangan sistem menengah masih berada

pada nilai toleransi peralatan SVC. Sehingga perangkat SCV masih mampu untuk memikul tegangan sistem tersebut secara langsung.

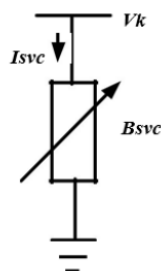
Didalam single line diagram dari sistem kontrol SVC dijelaskan input tegangan dari sistem diukur dengan trafo penurun tegangan yang diukur pada sisi primer dan sisi sekunder trafo. Hasil pengukuran akan dibaca/dimasukkan ke voltage measurement pada SVC. Hasil pembacaan akan dibandingkan antara $V_{\text{measurement}}$ dengan nilai V_{ref} . (tegangan referensi) pada voltage regulator, dimana nilai $V_{\text{ref}} = 1$. Apabila nilai V_{meas} . dan V_{ref} . tidak sama dengan 1, atau terjadi selisih nilai kedua unit tersebut maka SVC akan bekerja (operasi). Distribution unit akan mengirimkan nilai sudut penyalan untuk selanjutnya disinkronisasi nilai sekunder dan primer tegangan. Kemudian synchronizing unit akan membangkitkan pulse generator ke thyristor, yang berfungsi mengirimkan sinyal pulsa ke thyristor untuk bekerja mengoperasikan bank kapasitor atau induktor, dan SVC pun bekerja menginjeksikan/menyerap daya reaktif terhadap sistem.

SVC dipaparkan sebagai suatu konsep baru yang terpadu berdasarkan switching elektronika daya dan pengendali dinamis untuk meningkatkan pemanfaatan sistem dan kapasitas transfer daya seperti stabilitas, keamanan, keandalan dan kualitas daya sistem interkoneksi AC. SVC akan menginjeksi arus induktif atau menarik arus kapasitif tergantung pada keadaan. SVC sudah digunakan sebagai solusi untuk pengaturan tegangan dan kompensasi daya reaktif secara cepat dengan menaikkan kemampuan transfer daya dalam sistem tenaga. Berikut merupakan gambar dari skema SVC



Gambar 2. Skema SVC

SVC merupakan reaktansi variabel terhubung shunt yang membangkitkan atau menyerap daya reaktif untuk mengatur besar tegangan pada titik koneksi. SVC dipersiapkan untuk menyediakan daya reaktif dan pengaturan tegangan dengan cepat yang mana biasanya terhubung dengan bus yang memikul beban besar. Berikut ini merupakan model SVC.



Gambar 3. Model SVC

$$ISVC = jBSVC \times V_k$$

Keterangan :

V_k = Tegangan terminal pada bus k

$BSVC$ = Suspensi SVC

Sedangkan daya reaktif yang diinjeksikan pada bus k adalah:

$$Q_k = - Q_{k2} \times BSVC$$

METODE PENELITIAN

Studi pengasutan motor dilakukan dalam perancangan suatu sistem untuk memperhitungkan besarnya arus asut dan drop tegangan yang bermuara pada kestabilan power listrik dan berhasil tidaknya pengasutan sebuah motor. Idealnya, studi pengasutan motor harus dilakukan jika kapasitas motor melebihi 30% dari kapasitas transformator supply atau melebihi 10% dari kapasitas generator (bila power supply berasal dari Generator) terutama untuk motor yang menggunakan metode across-the-line /Direct on Line (DOL) [3]. Beberapa hal mungkin terjadi saat pengasutan motor, yang menyebabkan drop tegangan pada busbar yang berdampak buruk terhadap system lain dan akan cukup mengganggu dikarenakan durasi yang cukup lama, beberapa equipment yang sensitive akan mengalami penurunan performa, kegagalan operasi bahkan kerusakan peralatan.

Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan (voltage drop) merupakan dampak langsung dari pengasutan motor dalam system industry, tegangan di motor di busbar supply, dan juga busbar untuk sistem lain akan jatuh ke level tertentu dalam durasi pengasutan motor sebagai kompensasi peningkatan torque yang diperlukan motor.

Beberapa masalah akan muncul dikarenakan voltage drop dalam pengasutan motor, misalnya motor lain yang sedang berjalan normal akan melambat dengan jatuhnya tegangan, kemudian motor tersebut akan melakukan pengasutan ulang untuk mencapai kecepatan operasinya, pada saat pengasutan ulang, motor akan menjadi berat dikarenakan beban yang cukup besar yang memungkinkan beban motor akan melebihi breakdown torquency (saat voltage drop), memungkinkan motor akan melambat dan juga bisa stall. Kondisi ini akan menyebabkan motor menimbulkan arus besar dan bisa mengakibatkan kerusakan pada motor.

Beban-belan lain, seperti perangkat elektronik dan peralatan kontrol sensitif, akan terkena dampak buruk pada saat pengasutan motor. Toleransi jatuh tegangan beberapa peralatan bervariasi untuk setiap peralatan. Menurut IEEE Std 242-1986, Berikut toleransi level tegangan pada beberapa critical system saat pengasutan motor.

Table 1. Toleransi level tegangan berbagai peralatan

<i>Voltage Drop Location or Problem</i>	<i>Minimum allowable voltage (% rated)</i>
<i>At terminal of starting motor</i>	<i>80%^a</i>
<i>All terminals of others motors that must reaccelerate</i>	<i>71%^a</i>

AC contactor pick-up (by standard) (see 9.8 NEMA standards)	85%
DC contactor pick-up (by standard) (see 9.8 NEMA standards)	80%
Contactors Hold -in (average of those in use)	60-70% ^b
Solid State Control Devices	90% ^c
Noticeable light flicker	3% change
NOTE – More detail information is provided in table 51 of IEEE Std 242-1986	

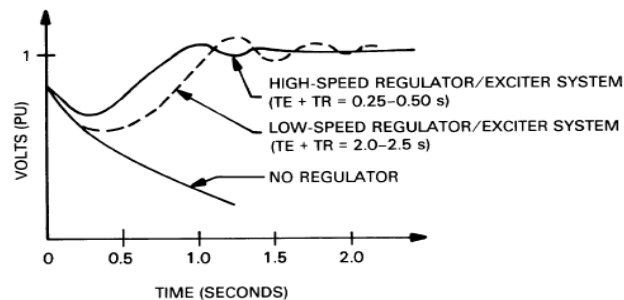
^aTypical for NEMA design motors only. Value may be higher (or lower) depending on actual motor and load characteristics.

^bValue may be as high as 80% for certain conditions during prolonged starting intervals.

^cMay typically vary by $\pm 5\%$ depending on available tap settings of power supply transformer when provided.

Power Generation

Dalam power system yang cenderung kecil biasanya akan disupply oleh pembangkit yang terbatas, dimana akan terdampak cukup signifikan saat terjadinya pengasutan motor besar. Pembangkitan yang terbatas akan menyebabkan tegangan jatuh pada sisi generator dikarenakan impedansi generator yang cukup tinggi selama transient waktu pengasutan motor. Type voltage regulator / system eksitasi generator akan berdampak cukup signifikan mempengaruhi pengasutan motor. Berikut kurva beberapa karakteristik voltage regulator/sistem eksitasi.



Gambar 4. Kurva karakteristik system eksitasi

Metode Pengasutan

Studi pengasutan motor pada dasarnya dilakukan untuk mengidentifikasi tegangan jatuh pada setiap bus di dalam system yang terkoneksi dan durasinya. Tegangan jatuh ini juga dipengaruhi oleh beberapa factor diantaranya, kapasitas peralatan supply yang memadai, besaran konduktor juga harus di evaluasi.

Beberapa metode dapat dilakukan untuk meminimalkan tegangan jatuh dalam durasinya, karena pada kenyataannya motor akan menghasilkan inrush current yang secara langsung proporsional dengan tegangan terminal motor. Lebih kecil tegangan pengasutan motor maka akan membutuhkan arus yang lebih kecil, sehingga mengurangi voltage drop di system lain. Ada beberapa metode yang dapat digunakan dalam pengasutan motor, Autotransformer dapat digunakan untuk mengontrol tegangan pengasutan motor, dengan standard tap 50% sampai 80% tegangan nominalnya, START-DELTA starter. Electronic Softstarter juga dapat digunakan untuk mengontrol tegangan, dan arus pengasutan motor, dan juga VFD sangat efektif dalam mengontrol pengasutan motor.

Beberapa metode pengasutan motor hanya belaku untuk tegangan rendah, dan juga untuk pengasutan pengontrolan tegangan akan mengakibatkan durasi pengasutan lebih lama, dan mungkin akan berdampak buruk pada system lain dikarenakan durasi tegangan jatuh lebih lam.

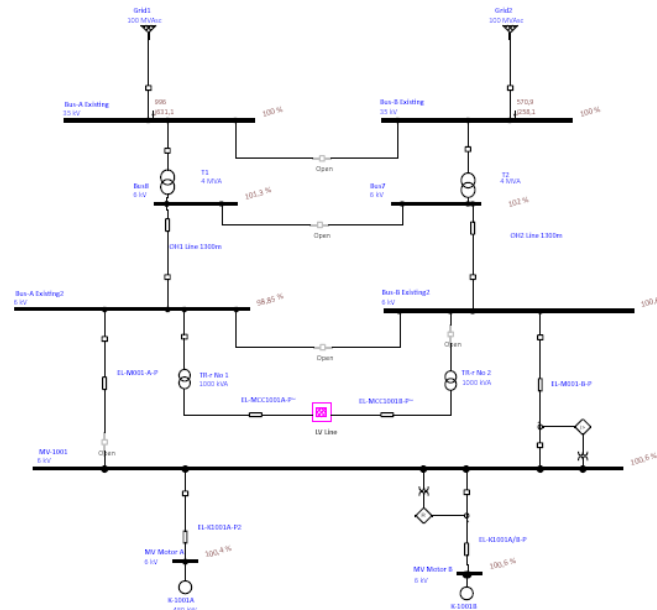
Metode lain dalam menekan arus asut yaitu dengan Capacitor Starting System, seperti pada penulisan ini, akan digunakan Static VAR Compensator (SVC), metode ini mampu menjaga stabilitas tegangan di sistem-sistem yang terkoneksi. Pada dasarnya komponen induktif saat pengasutan motor akan disupply dengan kapasitor yang terpasang sedekat mungkin dengan installasi motor. Kapasitor ini hanya akan di aktifkan saat pengasutan motor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dasar Perhitungan

Analisa ini akan dilakukan untuk pengasutan motor 450kW, 6kV menggunakan Kapasitor di Project Fasilitas Pengolahan Gas, Azerbaijan. Pengasutan sebenarnya menggunakan across-the-line (DOL), namun ada bebrapa kendala seperti voltage drop selama durasi pengasutan dan aliran arus yang cukup besar dari GRID sehingga mengganggu gardu utama yang berada 1.3km dari lokasi Fasilitas. Penulisan paper ini akan menganalisa penambahan SVC (kapasitor) untuk meminimalisir pengaruh pengasutan motor terhadap kesetailan system tenaga listrik.

Perhitungan akan dilakukan dengan simulasi ETAP sebagai tools, sumber listrik diperoleh dari Nasional Grid yang akan di simulasikan sebagai utility Grid dengan tegangan 35kV dengan asumsi level hubung singkat 1.65kA atau 100MVAsc.



Gambar 5. Electrical Single Line Diagram di Fasilitas Pengolahan Gas Azerbaijan

Terdapat dua sumber power yang terhubung secara redundant dan juga terdapat dua motor yang terpasang di busbar yang sama. System listrik 6kV disupplai dengan dua transformer 4000kVA yang bekerja secara redundant. Normalnya hanya satu line grid dan satu transformer yang digunakan untuk mensupply listrik ke fasilitas pengolahan Gas. Selain itu terdapat beban tegangan rendah melalui transformer 6kV/0,4kV 1000kVA, dengan beban

650kVA.

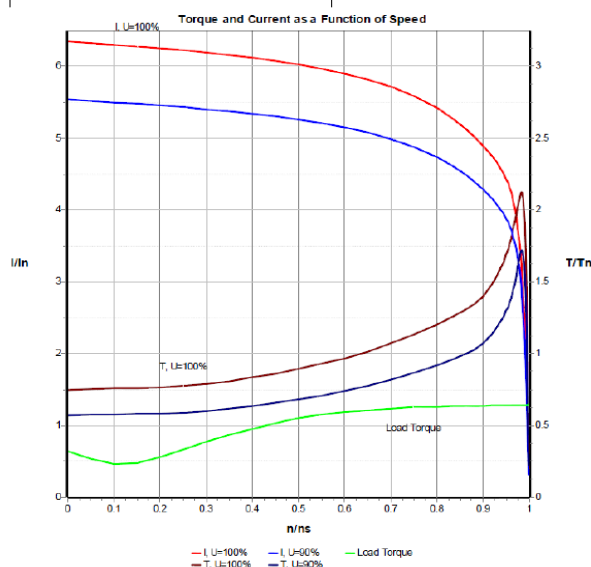
Analisa akan dilakukan terhadap pengasutan motor 450kW 6kV dan hanya akan di supply dengan salah satu line Grid dan Grid#2 akan digunakan sebagai main Grid. Karakteristik dan data motor diperoleh dari manufacturer (ABB) seperti berikut.

Table 2. Karakteristik Motor 450kW

Load characteristics	Load %	Current A	Efficiency %	Power Factor
	100	49	96.5	0.91
	75	37	96.2	0.91
	50	26	95.2	0.88
Sound pressure level: (sinus supply, no load)		83 dB(A), tol. + 3 dB(A), 1 m		
Weight of rotor		710 kg		
Total weight of Motor		3910 kg		
Inertia rotor / load		Approx. 10 kgm ² / 19.4 kgm ²		
Maximum stalling time		7.9 s (warm)		
Starting time		11.8 s (U=100%)		
		21.8 s (U=90 %)		
Number of consec. starts		3 / 2 (cold/hot)		
Maximum number of starts		1000 / year		
Warm-up time constant		70 min		
Cool-down time constant		195 min		

Motor type code: AMD 400L2R BABgS

Rated output	450 kW	Power Factor	0.91
Voltage	6000 V ± 5 %	Rated torque	1438 Nm
Frequency	50 Hz	Relat. starting current	6.3
Speed	2987 rpm	Relat. starting torque	0.75
Current	49 A	Relat. maximum torque	2.1

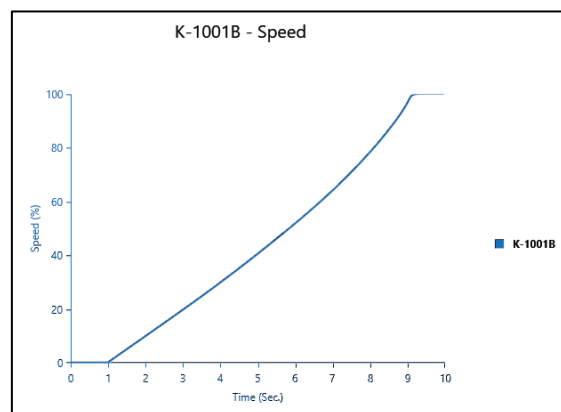


Running			
Stator resistance R_1 (125 °C)	0.38869 Ω	Rotor resistance R_2' (145 °C)	0.33546 Ω
Stator reactance X_1	7.8785 Ω	Rotor reactance X_2'	8.1374 Ω
Magnetizing reactance X_m	338.94 Ω	Iron loss resistance R_{Fe}	7.2 k Ω
Starting			
Stator resistance R_1 (75 °C)	0.33470 Ω	Rotor resistance R_2' (75 °C)	1.18305 Ω
Stator reactance X_1	6.7100 Ω	Rotor reactance X_2'	4.4031 Ω
Ambient condition			
Stator resistance R_1 (45 °C)	0.30231 Ω	Rotor resistance R_2' (45 °C)	1.06856 Ω

Motor 450kW 6 kV dimodelkan berdasarkan data-data dari manufacturer di atas dan telah di inputkan ke dalam ETAP library. Total waktu simulasi 10 detik.

Hasil Perhitungan Pengasutan DOL motor 450KW

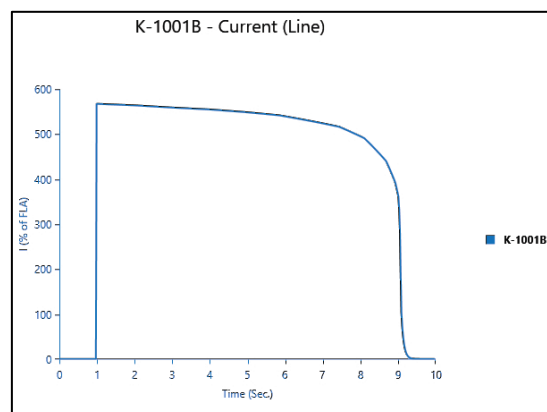
Durasi Pengasutan



Gambar 6. Kurva kecepatan vs waktu pengasutan

Dari kurva pada Gambar 6 terlihat bahwa dengan pengasutan DOL, motor berhasil mencapai kecepatan penuh dalam waktu 8 detik.

Arus Asut Motor

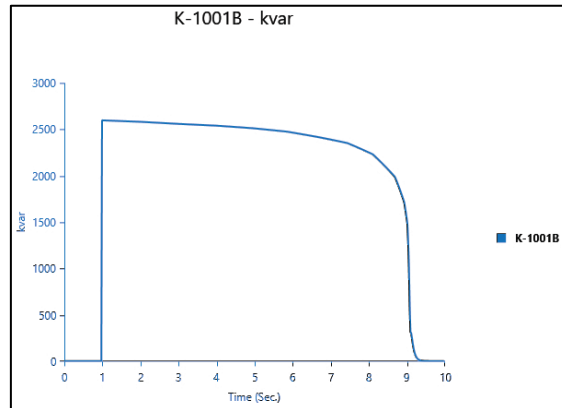


Gambar 7. Kurva arus vs waktu pengasutan

Meskipun pengasutan motor berhasil, namun menimbulkan dampak kurang baik terhadap

system lain, dikarenakan seperti pada grafik Gambar 7, arus pengasutan sekitar 560% dari arus nominal ($560\% \times 47\text{A} = 263\text{A}$) selama 8 detik.

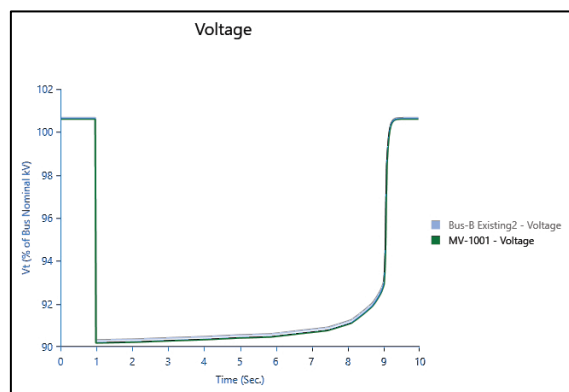
Motor Reaktif Power



Gambar 8. Kurva reaktif power vs waktu pengasutan

Pada saat pengasutan, motor membutuhkan reactive power yang cukup besar, dari kurva diatas menunjukkan bahwa reactive power yang diperlukan motor 450kW skitar 2600kVAR dan menurun seiring waktu pengasutan, artinya menurun seiring kecepatan motor meningkat.

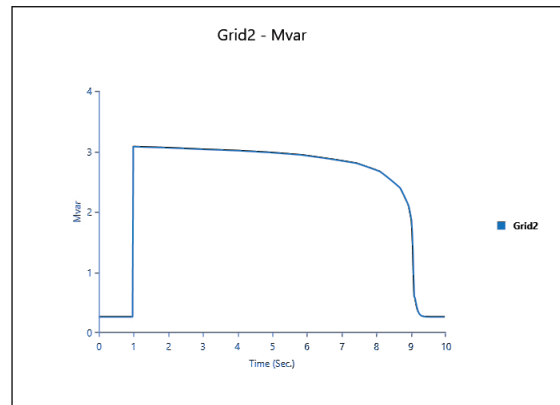
Jatuh Tegangan busbar yang terkoneksi



Gambar 9. Kurva tegangan busbar vs waktu pengasutan

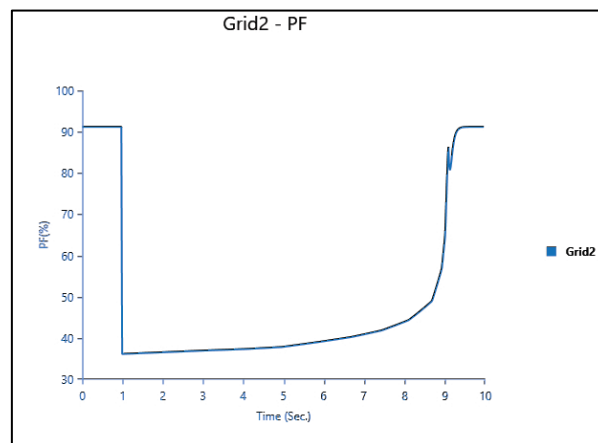
Tegangan busbar 6 kV di Fasilitas Pengolahan Gas jatuh ke level 90% selama 8 detik. Voltage dip di beban-beban level tegangan rendah setelah melewati transformer 6/0,4 kV 1000kVA terutama penerangan cukup terasa.

Grid Reaktif Power



Gambar 10. Kurva Reaktif Power Grid saat Pengasutan

Total daya reaktif yang diperlukan dari Grid saat pengasutan motor mencapai 3 MVAR, ini menimbulkan rendahnya power factor, sehingga kualitas sistem tenaga di Fasilitas Pengolahan Gas menjadi kurang baik saat pengasutan motor.



Gambar 11. Kurva Grid power factor saat pengasutan motor 450KW

Pembahasan Hasil Perhitungan

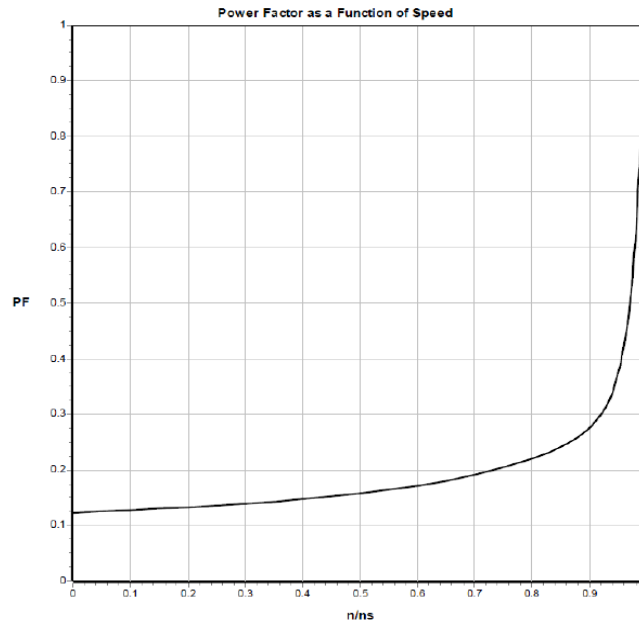
Pada pengasutan DOL arus asut mencapai 560% dari nominal arus motor (Gambar 6.). Tingginya arus asut pada motor disebabkan beberapa hal yang berkaitan dengan konsep gaya gerak listrik (GGL/EMF) pada motor.

Ketika motor induksi dihidupkan, rotor diam, dan tidak ada EMF balik yang dihasilkan pada belitan rotor. Akibatnya, belitan stator mempunyai jalur impedansi rendah, yang menyebabkan arus tinggi mengalir melaluinya untuk menghasilkan medan magnet yang diperlukan untuk menghidupkan motor.

EMF Balik adalah gaya gerak listrik yang diinduksikan pada belitan rotor akibat putaran rotor. EMF balik ini melawan aliran arus pada belitan stator dan membantu membatasi arus yang ditarik oleh motor. Namun, pada saat startup, pada awalnya tidak ada EMF balik, sehingga motor menarik arus yang lebih tinggi hingga rotor mulai berputar dan EMF balik dihasilkan. Saat rotor berputar maka EMF balik meningkat dan menginduksi belitan stator dengan arah yang berlawanan sehingga arus di stator mulai berkurang, sampai kecepatan rotor mendekati kecepatan medan magnet dari belitan stator.

Factor daya (ns) yang cukup rendah saat awal pengasutan merupakan fungsi dari

kecepatan $pf = f(ns)$. Sesuai dengan data dari manufaktur bahwa factor daya merupakan fungsi dari kecepatan motor seperti gambar 12 berikut.

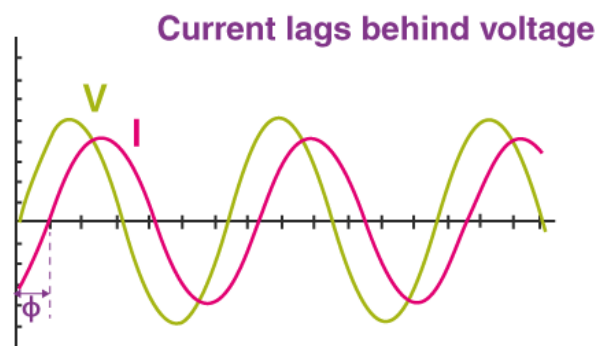


Gambar 12. Kurva Power Factor vs kecepatan saat pengasutan motor 450KW

Alasan rendahnya faktor daya pada awalnya adalah rangkaian ekivalen rotor motor bersifat induktif ketika kecepatan motor nol dan rasio slip s sama dengan satu. Faktor daya akan meningkat karena rasio slip s berkurang seiring dengan bertambahnya kecepatan. Ketika kecepatan motor mencapai nilai nominalnya, rangkaian ekivalen motor bersifat resistif dan faktor daya mencapai maksimum.

Power factor (pf) = $\cos \emptyset$

Dimana $\emptyset$ merupakan sudut antara tegangan dengan arus, semakin besar sudutnya maka akan semakin besar factor daya nya



Gambar 13. Kurva Sinusoidal tegangan dan arus dengan kondisi lagging

Bila dikaitkan dengan daya aktif dan daya reaktif maka:

$$P = \sqrt{3} \times V_{LL} \times I \times \cos \emptyset$$

$$Q = \sqrt{3} \times V_{LL} \times \sin \emptyset$$

Dimana:

P : Daya Aktif (W)

Q : Daya Reaktif (VAR)

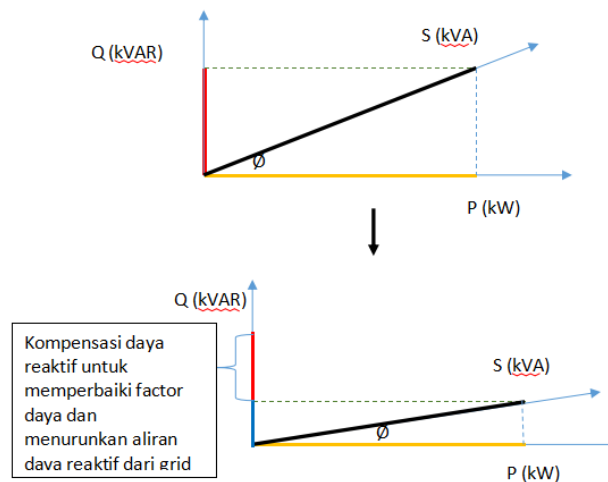
VLL : Tegangan Line to Line (V)

I : Arus yang mengalir

Semakin rendah factor daya semakin besar sudut antara tegangan dan arus (ϕ) maka $\sin\phi$ akan semakin besar, artinya beban reactive yang timbul akan semakin besar. Seperti pada hasil simulasi Gambar 8., pengasutan motor 450kW membutuhkan aliran daya reactive 2500kVAR. Rendahnya factor daya dan tingginya beban reaktif akan mempengaruhi kesetabilan sistem kelistrikan dan juga sumbernya. Oleh karena itu, perlu dilakukan kompensasi daya reaktif secara dinamis pada proses start motor dan meningkatkan faktor daya secara efektif.

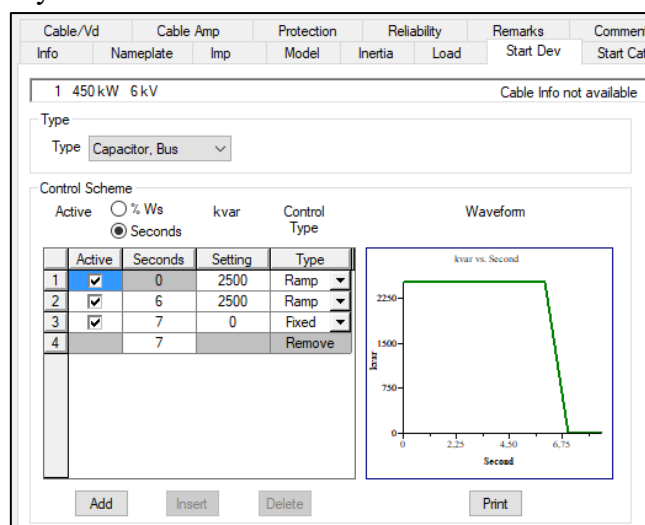
Meningkatkan power factor system dengan melakukan kompensasi daya reaktif bias dilakukan dengan pemasangan Kapasitor atau SVC (Static VAR Compensator) seperti yang dilakukan dalam studi ini.

Gambaran dasar SVC bila di aplikasikan untuk perbaikan power factor:



Gambar 14. Kurva Segitiga Daya

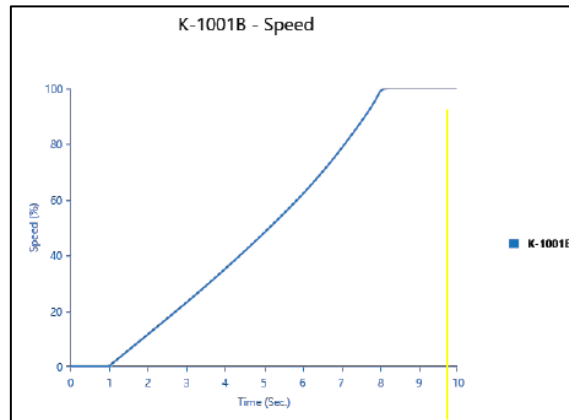
Dari perhitungan/simulasi pengasutan DOL, terlihat beban reactive yang dihasilkan motor 450kW sebesar 2500kVAR. Pada perhitungan pengasutan dengan SVC, dipilih SVC 2500kVAR, di seting hanya selama 6 detik.



Gambar 15. Setting SVC 2500kVAR pada ETAP

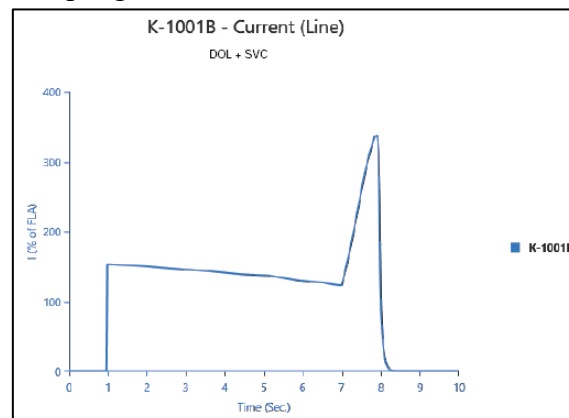
Hasil Simulasi Penerapan SVC Pada Pengasutan DOL

Durasi Pengasutan

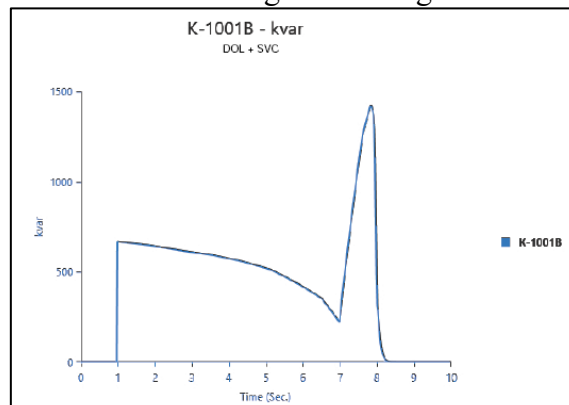


Gambar 16. Kurva Pengasutan dengan SVC 2500KVAR

Durasi pengasutan dengan penerapan SVC menjadi lebih cepat 1 detik, itu dikarenakan tegangan di sisi terminal motor lebih terjaga, motor torque yang dihasilkan akan lebih besar sehingga mempercepat proses pengasutan.

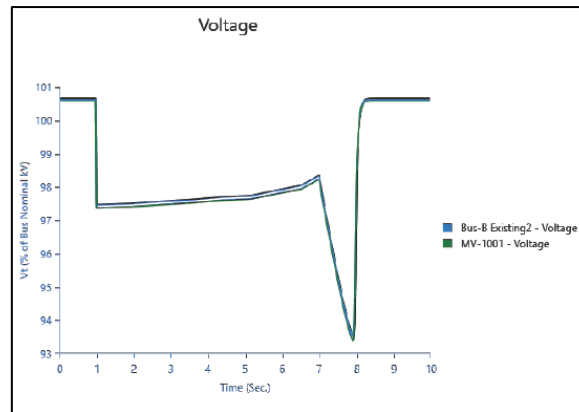


Gambar 17 Grafik Arus Pengasutan dengan SVC 2500kVAR

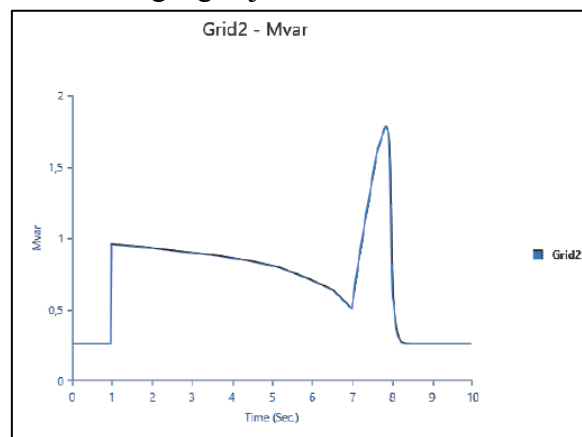


Gambar 18 Grafik Beban Reaktif Pengasutan dengan SVC 2500kVAR

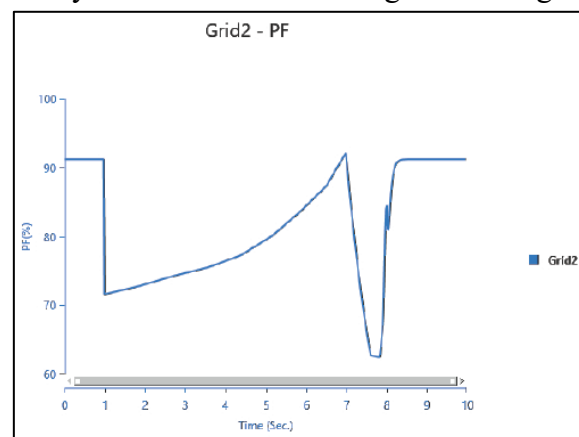
Dari dua gambar diatas, terlihat sangat jelas terjadi penurunan arus pengasutan yang signifikan dari 560% menjadi 150%, dengan arus puncak 300% dengan durasi kurang dari 1 detik, juga penurunan beban reaktif dari 2500kVAR menjadi sekitar 650kVAR dengan puncak 1300kVAR dalam durasi kurang dari 1 detik.



Gambar 19 Grafik Tegangan Busbar saat Pengasutan dengan SVC 2500kVAR
Tegangan jatuh di sisi upstream juga jauh lebih baik, dengan penerapan SVC tegangan jatuh hanya sekitar 3%, hanya di akhir tegangan jatuh sekitar 7 % selama kurang dari 1 detik.



Gambar 20 Grafik Daya Reaktif Grid saat Pengasutan dengan SVC 2500kVAR



Gambar 21 Grafik factor daya Grid saat Pengasutan SVC 2500kVAR

Beban MVAR Grid menurun cukup drastis, dari 3MVAR menjadi 1 MVAR, menandakan pemasangan SVC untuk pengasutan motor cukup memberikan dampak lebih baik yang cukup signifikan. Kualitas supply tenaga listrik juga membaik. Power factor tidak turun cukup signifikan, hanya sampai 70%.

KESIMPULAN

Penerapan Soft Starter Voltage Controller (SVC) untuk pengasutan motor memberikan dampak yang lebih baik dibandingkan metode Direct-On-Line (DOL). Dengan SVC, tegangan

jatuh di upstream busbar hanya 3%, jauh lebih rendah dibandingkan DOL yang mencapai 10%, sehingga menjaga stabilitas sistem. Selain itu, SVC berhasil menekan arus pengasutan motor hingga 150%, jauh di bawah DOL yang mencapai 560%, mengurangi risiko kerusakan peralatan dan penghantar. Dari sisi daya reaktif, SVC hanya membutuhkan 1MVAR dari Grid, lebih efisien dibandingkan DOL yang memerlukan 3MVAR, serta menghasilkan power factor yang lebih baik, sehingga meningkatkan keandalan pembangkit.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S., Khan, M., & Hussain, A. (2020). Penempatan SVC yang optimal untuk peningkatan stabilitas tegangan pada sistem tenaga listrik industri. *Jurnal Internasional Sistem Tenaga Listrik & Energi*, 118, 105774.
- Chowdhury, S., Ghosh, A., & Begum, S. (2017). Manajemen daya reaktif pada jaringan industri dengan motor induksi. *Energy Procedia*, 142, 2762–2768.
- Deshmukh, S., & Patil, V. (2021). Investigasi kompensasi daya reaktif untuk beban industri. *Jurnal Teknik Elektro & Teknologi*, 16(2), 945–956.
- Gao, H., Yu, J., & Wang, L. (2022). Teknologi SVC canggih untuk kontrol tegangan dan peningkatan aliran daya. *Electric Power Systems Research*, 212, 108642.
- Ghosh, R., Mitra, A., & Pal, A. (2020). Peningkatan kualitas daya menggunakan perangkat FACTS dalam sistem industri. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110338.
- Huang, L., Zhou, Y., & Fang, X. (2018). Mitigasi harmonik dan pengendalian kedipan tegangan menggunakan SVC dalam industri baja. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(4), 3472–3480.
- Khalil, R., Saeed, T., & Khan, F. (2022). Aplikasi SVC dalam sistem tenaga industri berat. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 16(3), 505–514.
- Kumar, N., Singh, V., & Yadav, R. (2021). Kompensator VAR statis dalam industri modern: Sebuah tinjauan. *Laporan Energi*, 7, 4351–4364.
- Lee, S., & Kim, D. (2018). Peningkatan stabilitas tegangan melalui kontrol optimal SVC. *Energies*, 11(8), 2110.
- Li, Y., & Zhao, X. (2019). Analisis permasalahan daya reaktif pada sistem penggerak motor induksi. *Jurnal Teknik Elektro*, 70(5), 345–353.
- Ouyang, J., Wang, Y., & Chen, P. (2023). Peningkatan kualitas daya pada industri beban variabel menggunakan SVC. *IEEE Access*, 11, 56102–56112.
- Pandey, P., Thapa, B., & Karki, R. (2022). Peningkatan keandalan sistem menggunakan SVC dan filter harmonik. *Jurnal Internasional Sistem Tenaga Listrik yang Berkembang*, 23(1), 67–83.
- Prakash, S., Reddy, M., & Rao, T. (2021). Kompensasi dinamis kedipan tegangan menggunakan SVC. *Komponen dan Sistem Tenaga Listrik*, 49(9), 847–857.
- Rahman, A., Noor, H., & Bakar, N. (2023). Mitigasi fluktuasi tegangan berbasis SVC pada jaringan modern. *Jurnal Sistem Kelistrikan dan Teknologi Informasi*, 10(1), 15.
- Roy, A., & Jadhav, R. (2021). Sebuah studi tentang perbaikan profil tegangan menggunakan SVC pada saluran transmisi. *Energi*, 226, 120383.
- Singh, A., & Sharma, P. (2023). Optimasi kompensasi daya reaktif menggunakan SVC. *Konversi dan Manajemen Energi*, 281, 116825.
- Thakur, R., Sharma, K., & Jain, A. (2019). Kontrol daya reaktif dan kedipan tegangan menggunakan perangkat FACTS. *Transaksi Internasional Sistem Energi Listrik*, 29(10), e12028.
- Wang, H., & Lu, Z. (2023). Strategi kompensasi daya reaktif sistem tenaga industri. *Energi*, 16(4), 1452.

- Wang, Y., Zhao, P., & Liu, S. (2020). Perangkat FACTS untuk peningkatan kualitas daya di industri modern. *Teknologi dan Penilaian Energi Berkelanjutan*, 42, 100882.
- Zhao, Y., Sun, L., & He, J. (2019). Analisis stabilitas daya dengan implementasi SVC. *Transaksi IEEE tentang Pengiriman Daya*, 34(5), 1958–1967.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.