

STUDI KELAYAKAN TEKNIS KERETA CEPAT PADA REL KERETA API LISTRIK (COMMUTER LINE) DI INDONESIA

Muhammad Abdullah Umar¹, H. Muhammad Taqiyyuddin A², Bambang Dwi Sulo³

^{1,2,3} Teknik Elektro, Universitas Islam Malang

muhammadabdullahumar@gmail.com, taqijuddin.alawiy@unisma.ac, dwisb58@gmail.com

Abstract

The electric railroad is a means of transportation that moves based on an electrification system. On the electric rail train, the electrification system functions to distribute electrical power from the catenary network to the motor cabin and several other cabins so that the train can run. This research discusses the power of the 1500 VDC electric rail network to drive the train propulsion system when the power of the traction motor is enlarged. The propulsion system itself consists of a pantograph, circuit breaker, DC filter, invert VVfH IGBT and a traction motor. With 750kW and 450kW input power test parameters. By calculating through the matlab r2107a software from the predetermined equations, it can be seen that the train propulsion system will have good efficiency when the voltage flows 388.7 V with an inverter output power of 399.74 kW. Where obtained the amount of inverter efficiency 88.83%. The catenary network 1500 VDC is not capable of running a fast train an output of 283kW and is only capable of running a train with a maximum output of 193.1kW.

Keywords: Catenary network, electrification system, traction motor, inverter VVfH IGBT, power losses, propulsion system

Abstraksi

Kereta rel listrik merupakan alat transportasi yang bergerak berdasarkan sistem elektrifikasi. Pada kereta rel listrik sistem elektrifikasi berfungsi untuk mengalirkan daya listrik dari jaringan *catenary* menuju motor *cabin* dan beberapa kabin lainnya hingga kereta tersebut bisa berjalan. Pada penelitian ini dibahas tentang kekuatan jaringan rel listrik 1500 VDC sebagai penggerak sistem propulsi kereta pada saat daya motor traksi di perbesar. Sistem propulsi sendiri terdiri dari pantograf, *circuit breaker*, *filter DC*, *invert VVfH IGBT* dan motor traksi. Dengan parameter pengujian daya masuk 450kW. Dengan menghitung melalui software matlab r2107a dari persamaan yang sudah ditentukan dapat diketahui bahwa sistem propulsi kereta akan memiliki efisiensi yang baik saat tegangan yang mengalir 388.7V dengan daya keluaran inverter 399.74 kW. Dimana diperoleh besarnya efisiensi inverter 88.83%. Jaringan katenari 1500 VDC tidak mampu menjalankan kereta cepat dengan output 283kW dan hanya mampu menjalankan kereta dengan output maksimal 193.1kW.

Kata kunci : Jaringan *catenary*, sistem *elektrifikasi*, motor traksi, inverter VVfH IGBT, rugi-rugi daya, sistem *propulsi*

I PENDAHULUAN

Kereta api adalah alat transportasi yang berjalan di sepanjang lintasan rel yang terdiri dari lokomotif dan beberapa gerbong. Peningkatan jumlah penumpang kereta api sejalan dengan terus berkembangnya perindustrian kereta api hingga sekarang berkembang kereta rel listrik (KRL). Dengan

semakin meningkatnya jumlah unit KRL yang beroperasi maka perlu diperhatikan efisiensi suplai daya pada jaringan *catenary* untuk sistem kerja yang maksimal terkhusus pada sistem propulsi. Pada bagian sistem propulsi KRL menggunakan inverter VVfH IGBT sebagai pengatur kecepatan motor dan pengubah arus DC menjadi arus AC. pada

bagian inverter dan motor traksi mempunyai rugi-rugi tersendiri pada kondisi tertentu sehingga mempunyai efisiensi yang berbeda-beda. Maka untuk mengetahui kebutuhan daya yang digunakan untuk menggerakkan kereta maka besarnya rugi-rugi dan daya keluaran setiap komponen perlu diperhatikan.

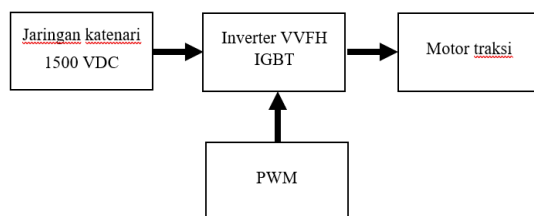
Penelitian “Studi Kelayakan Teknis Kereta Cepat Pada Rel Kereta Api Listrik (Commuter Line) di Indonesia” disusun untuk mengetahui kebutuhan suplai daya pada setiap komponen sistem propulsi sehingga dapat diketahui kekuatan maksimal pada jaringan *catenary*.

II METODOLOGI

A. Tempat dan Waktu

Penelitian tentang “Studi Kelayakan Teknis Kereta Cepat Pada Jaringan Commuter Line 1500 VDC di Indonesia” dilakukan di PT. Industri kereta api (PT. INKA) yang terletak di jalan Yos Sudarso, No. 71, Madiun Lor, Madiun, Jawa Timur. Penelitian dilakukan pada bulan maret 2020.

B. Blok Diagram Sistem



Gambar 3.2. Blok Diagram Sistem

Pada Gambar 3.2 dijelaskan bahwa blok diagram terdiri dari 4 bagian yang terdiri dari jaringan katenari sebagai suplay daya sistem elektrifikasi. Sumber input inverter diperoleh dari jaringan katenari 1500 VDC, untuk pengaturan tegangan output inverter menggunakan PWM.

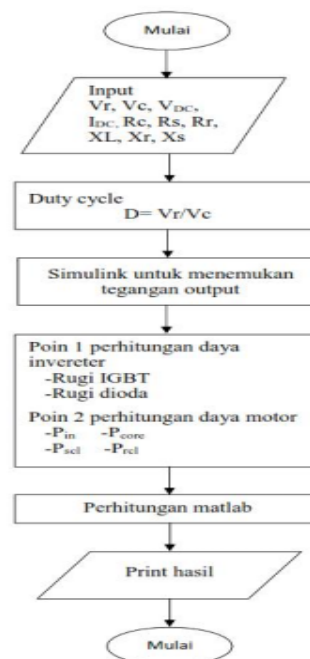
Tabel 3.1. Parameter suplai daya

Variabel	Spesifikasi
Tegangan masuk	1500 VDC
Arus Masuk	1200 A
Daya Input	1800 kW
Motor AC	200 kW
Inverter	3300V/1500A

Tabel 3.2. Spesifikasi VVPH IGBT

Nama Komponen	Nilai
Tegangan	3300 V
Arus	1500 V
$V_{ce\ sat}$	3,25 V
$R_{g\ on}$	1 ohm
$V_{ge\ on}$	15 V
$V_{ge\ off}$	15 V
$R_{g\ off}$	1,5 ohm

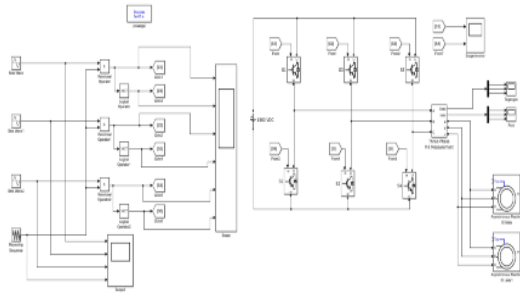
C. Flowchart



Gambar 3.4. Flowchart

Gambar 3.4 menunjukkan langkah yang digunakan dalam melakukan analisa yang dimulai memasukkan nilai Vr, Vc, VDC, Idc, Rc, Rs, Rr, XM, Xr, Xs. Untuk menghitung rugi

IGBT dan diode terbagi menjadi rugi konduksi (P_{cond}) dan rugi switching (P_{sw}).



Gambar 3.5. rangkaian simulasi pada simulink

Rangkaian pada Gambar 3.5 simulink digunakan untuk mengetahui besar tegangan output inverter. Hasil tegangan input inverter dipengaruhi oleh besar kecilnya tegangan referensi pada pembangkitan sinyal PWM. Simulasi dilakukan dengan memvariasikan tegangan referensi sebesar 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, dan 0.5. pada paper ini akan dipaparkan hasil perhitungan pada tegangan referensi 0.5 karena pada tegangan referensi 0.5 daya yang dibutuhkan oleh motor traksi dapat terpenuhi dengan maksimal.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

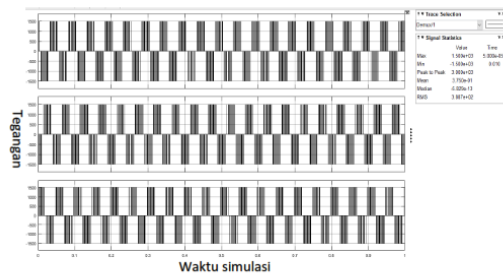
A. Daya Inverter VVfH IGBT

Daya pada sistem prolasi KRL disuplai oleh jaringan katenari 1500VDC yang dirubah menjadi arus AC dengan inverter VVfH IGBT. Untuk menemukan daya output inverter harus dilakukan perhitungan untuk menemukan rugi-rugi daya.

```
clear all
clc
Vt = input;%Output tegangan
simulasi
Vr = input;% Parameter tegangan
referensi
Vc = 4;% Parameter tegangan
carrier
Vcesat = 3.25;%Database tegangan
saturasi
Ic = 1500;%Database arus keluaran
Inom = 1500;%Database Arus IGBT
Vnom = 3300;%Database tegangan
IGBT
Fsw = 200;%Parameter frekuensi
switching
```

```
Vdc = 1500;%Tegangan input DC
jaringan katenari
Idc = 300;%Arus jaringan katenari
If = 1500;%Database arus medan
Vf = 2.2;%Database tegangan medan
Vge = 15;%Tegangan gate emitter
Rg = 1;% Tahanan gate
Vgeon = 15;%Tegangan gate on
Rgon = 1;%Tahanan gate on
Vgeoff = 15;%Tahanan gate emitter
off
Rgoff = 1.5;%Tahanan gate off
f = 20;%Frekuensi output
%Daya jaringan katenari
Pin = Vdc*Idc;
% Daya Switch on
Eon = ((Vgeon)^2/Rgon);
%Daya Switch Off
Eoff = ((Vgeoff)^2/Rgoff);
%PERHITUNGAN RUGI-RUGI IGBT
%Duty cycle
D = Vr/Vc;
%Rugi konduksi IGBT
Pkcond = 6*Vcesat*Ic*D;
%Arus Puncak
Ipk = (Pin/Vt)/3;
%Rugi switching IGBT
Psw =
6*((Eon+Eoff)*Ipk*Fsw*Vdc)/(pi*Inom*Vnom);
%Rugi-rugi total IGBT
Pigbt = Pkcond+Psw;
%Daya Output IGBT
Poutigbt = Pin-Pigbt;
%Efisiensi IGBT
EFFigbt = (Poutigbt/Pin)*100;
%PERHITUNGAN DIODA
%Rugi-rugi konduksi dioda
Pdcond = Vf*If;
%Daya recovery reverse
Erec = (Vge)^2/Rg;
%Rugi-rugi recovery reverse
Preddioda =
(Erec*Ipk*Fsw*Vdc)/(pi*Inom*Vnom);
%Rugi-Rugi total dioda
Ptigbt = 6*(Pdcond+Preddioda);
%RUGI-RUGI INVERTER VVfH IGBT
%Rugi-rugi total inverter VVfH IGBT
Ptinverter = Ptigbt+Pigbt;
%Daya Output inverter
Poutinverter = Pin-Ptinverter;
%Effisiensi inverter
EFFinverter =
(Poutinverter/Pin)*100;
```

Inverter VVfH IGBT sebagai suplai daya pada motor traksi. Pada tegangan referensi 0.5 menghasilkan daya maksimal.



Gambar 4.15. Tegangan 388.7 V pada sinyal referensi 0.5 V
Sumber: Data pribadi

Pada Gambar 4.15 merupakan gelombang output simulasi yang menghasilkan tegangan output inverter 388.7V. Hasil tegangan output akan mempengaruhi rugi-rugi daya pada sistem propulsi. Berikut hasil rugi-rugi daya pada inverter VVfH IGBT:

```

-----> PWM
TEGANGAN REFERENSI      = 0.5
TEGANGAN CARRIER       = 4
DUTY CYCLE                = 0.125

-----> INVERTER VVfH IGBT
TEGANGAN OUTPUT          = 388.7 V
RUGI-RUGI IGBT           = 20.4067 KW
DAYA OUTPUT IGBT         = 429.5933 KW
RUGI KONDUKSI DIODA      = 3.3 KW
DAYA RECOVERY REVERSE    = 0.225 KW
RUGI RECOVERY DIODA      = 1.675 KW
RUGI-RUGI TOTAL DIODA    = 29.8502 KW
RUGI TOTAL INVERTER      = 50.2569 KW
DAYA OUTPUT INVERTER     = 399.7431 KW
EFESISIENSI INVERTER    = 88.8318 %
    
```

Hasil perhitungan daya inverter VVfH IGBT sebagai berikut:

$$P_{out} = P_{in} - P_{loss}$$

$$P_{out} = 450kW - 50.2569kW$$

$$P_{out} = 399.7431kW$$

Daya output inverter 399.7431 kW digunakan untuk mensuplai motor traksi.

B. Daya Motor Traksi

Sistem propulsi KRL terdiri dari inverter VVfH IGBT dan motor traksi. Inverter VVfH IGBT sebagai pensuplai daya sedangkan motor traksi sebagai penggerak. Perhitungan daya dilakukan untuk mengetahui daya input motor traksi dan daya output motor traksi.

%parameter motor traksi

```

R1 = 0.04581;
R2 = 0.0408;
Rc = 108;
X1 = 0.3851;
X2 = 0.309;
Xm = 22;
S = 0.02;
P = 4;
    
```

%RUGI-RUGI MOTOR TRAKSI 200KW

```

j = sqrt(-1);
%tegangan line to line
V_L = Vt*sqrt(3);
V1 = Vt+j*0;
%impedansi
Z1 = R1 + j*abs(X1);
RLd= R2*(1-S)/S;
R2ds=R2/S;
Z2=R2ds + j*abs(X2);
Gc = 1/Rc;
Bm = 1/abs(Xm);
Y2=1/Z2 ;
Ye=Gc-j*Bm;
Ze = 1/Ye;
Yf=Y2+Ye;
Zf=1/Yf; Rf = real(Zf); Xf =
imag(Zf);
Zin=Z1+Zf; Rin = real(Zin); Xin =
imag(Zin);
Zth= Z1*Ze/(Z1+Ze);
Vthc=V1*Ze/(Z1 +Ze);
%arus pada rangkaian ekuivalen
I1=V1/Zin;
I1m=abs(I1);
T1=angle(I1)*180./pi;
I2= Ze*I1/(Ze+Z2);
T2=angle(I2)*180/pi;
I2m=abs(I2);
Io=I1-I2; Iom=abs(Io);
Ao=angle(Io)*180/pi;
%Daya input motor
P1 = 3.*V1*conj(I1);
Pinmotor = real(P1);
%Rugi tembaga stator
Psc1 = 3*R1*I1m^2;
%Rugi inti Stator
Pcore=3*real(Ze)*Iom^2;
%Total rugi stator
Prugistator = Psc1+Pcore;
%Rugi tembaga rotor
Prcl = 3.*R2*I2m^2;
%Daya Mekanik
Ploss = Psc1+Pcore+Prcl;
Pm = Pinmotor-Ploss;
%Torsi
Ns=120.*f/P;
Nr=(1.-S)*Ns;
Ws=2.*pi*Ns/60;
Vth=abs(Vthc); Tth =
angle(Vthc)*180/pi;
Rth=real(Zth);
Xth=imag(Zth);
Rdd=sqrt(Rth^2 + (Xth+X2)^2);
Smax=R2/Rdd;
Pmax=1.5*Vth^2./(Rth+Rdd);
Tmax=Pmax/Ws;
%Effisiensi Motor
Effmotor= (Pm/Pinmotor)*100;
    
```

Dari perhitungan rumus di atas rugi-rugi daya motor traksi sebagai berikut:

=====> MOTOR TRAKSI	
Arus input	= 180.3018 A
DAYA INPUT MOTOR	= 193.1115 KW
RUGI TEMBAGA STATOR	= 4.4677 KW
RUGI INTI STATOR	= 3.5759 KW
RUGI TEMBAGA ROTOR	= 3.7014 KW
RUGI MOTOR TRAKSI	= 11.745 KW
DAYA OUTPUT MOTOR	= 181.3665 KW
TORSI MOTOR TRAKSI	= 4740.4915 Nm
EFISIENSI MOTOR TRAKSI	= 93.918 %

Hasil perhitungan rugi-rugi daya pada motor traksi dengan jumlah motor traksi pada setiap inverter VVFG IGBT adalah sebagai berikut:

$$P = 2 \times 193.1115 \text{ kW}$$

$$P = 386.223 \text{ kW}$$

Sehingga daya inverter dapat mensuplai motor traksi karena daya output inverter lebih besar dari pada daya input motor traksi

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan, diperoleh beberapa hasil tentang kelayakan jaringan 1500VDC pada kinerja motor traksi sebagai berikut:

1. Untuk menganalisa daya KRL pada jaringan katenari 1500 VDC dengan daya masuk 450kW disimpulkan daya maksimal yang bisa digunakan pada inverter VVFG IGBT dengan daya output 399,75kW sehingga daya input motor traksi 193,11kW yang digunakan, agar daya output inverter VVFG IGBT bisa mensuplai daya input motor traksi.
2. Dari 6 kondisi pengujian disimpulkan bahwa kemampuan maksimal jaringan katenari 1500VDC berada pada pengujian ke 5 dengan tegangan 388,7 V dan tegangan referensi 0,5V akan menghasilkan daya output inverter 399,75kW. Pada motor traksi daya masuk 193,11 kW dan daya output 181.36 kW. Pada kereta cepat membutuhkan daya output 283kW, sehingga jaringan katenari 1500VDC di Indonesia belum memenuhi standar kereta cepat.

B. Saran

Berikut merupakan beberapa saran untuk penelitian selanjutnya tentang kereta rel listrik:

1. Dilakukan penelitian tentang kereta rel listrik yang lebih mendalam dengan beban selain motor traksi. Dan sistem auxiliary pada kereta rel listrik.
2. Menjadikan jaringan katenari sebagai objek penelitian untuk mengetahui jika pantograf pada kereta rel listrik terjadi masalah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Buhrkall, L. Traction System Case Study. Denmark.
- [2] Cahya, Agus, Dedi Cahya, dkk. Rancang Bangun Inverter 3 Fasa untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi. Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [3] Iftadi, Irwan. 2015. Kelistrikan Industri. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [4] Maghfiroh, Hari. 2016. Dunia Kereta Sistem Propulsi KRL, <http://www.keretalistrik.com/2016/07/dunia-kereta-sistem-propulsi-krl.html>. diakses pada hari Senin, 4 Mei 2020, pukul 20.00 WIB
- [5] Mantila, S. Cornio E. Romero L. F. 2008. How The Efficiency of Induction Motor is Measured. Department of Electrical Engineering and Energy. Universidad de Cantabria, Spain.
- [6] Matsumoto Masakazu, Seikon Shibichi, and Wajima Takenori. 2005. Latest System Technology for Railway Electronic Cars.
- [7] Maulana, Eka. 2012. Pengaturan PWM. Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan. Universitas Brawijaya Malang.
- [8] Nugroho, Setiyo dan Ir. Bambang Winardi. 2012. Sistem Propulsi dan Auxiliary pada Kereta Rel Listrik. Semarang: Teknik Elektro, UNDIP.
- [9] Rao, Noman dan Dinesh Chamund. 2014. Calculating Power Loss in an IGBT Module.
- [10] Rashid, Muhammad Hannur. Power Electronics Circuit, Devices,

- andApplication. PURDUE UNIVERSITY.
- [11] Ren, J., Zhang, Q., & Liu, F. (2020). Analysis of factors affecting traction energy consumption of electric multiple unit trains based on data mining. *Journal of Cleaner Production*, 121374.
- [12] Saputra, A. (2019). Studi Evaluasi Analisa Perhitungan Kapasitas Daya Gardu Traksi Terhadap Kebutuhan KRL Jalur Depok-Manggarai. *EPIC (Journal of Electrical Power, Instrumentation and Control)*, 2(2), 131-138.
- [13] Sembiring, Reynhard Josian dan Feri Yusviar. Rancang Bangun Inverter Tiga Fasa menggunakan IPM PM50RLA120 dan NI CompactRIO. Teknik Elektro, Universitas Indonesia.
- [14] Serrano-Jiménez, D., Abrahamsson, L., Castaño-Solís, S., & Sanz-Feito, J. (2017). Electrical railway power supply systems: Current situation and future trends. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 92, 181-192.
- [15] Setiawan, Achmad Efendi, Tjahya Odinanto dan Syahri Muharom. 2016. Rancang Bangun Inverter 3 Fasa sebagai Pengendali Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa 1/2HP 0.37kW menggunakan Metode SPWM Berbasis ARM Mikrokontroler (STM32F4) Jurusan teknik Elektro, Institut teknologi Adhi Tama, Surabaya.
- [16] Sudibya, Samuel, dkk. 2016. Analisis Efisiensi Motor Induksi pada Kondisi Tegangan Non Rating dengan Metode Segregated Loss. Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik UNIB.
- [17] Wang Ji. Zhongping Yang, dkk. 2013. Harmonic Loss Analysis of the Traction Transformer of High-speed Trains Considering Pantograph-OCS Electrical Contact Properties. School of Electrical Engineering, Beijing.
- [18] Yudho, U. Sistem Propulsi Pada Kereta Rel Listrik Di Depo KRL Depok.
- [19] _____. 2011. Petunjuk Operasi KRL-KFW. PT. INKA (Persero)