

DOI <http://dx.doi.org/10.36722/sst.v9i3.2910>

Desain Penggunaan *Variable Frequency Drive* (VFD) Pada *Starting-Up* Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Metode *Sinusoidal Pulse-Width Modulation* (SPWM)

Prima Sumarta^{1*}, Zulfatri Aini¹

¹Program Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, Jl. HR. Soebrantas No. KM. 15, Kota Pekanbaru, 28293.

Penulis untuk Korespondensi/E-mail: prima.sumarta2000@gmail.com

Abstract – During the start up process, the induction motor has a fairly high starting current. It can even reach four to eight times the motor's nominal current. An initial current that is large enough and repeated over a short period of time can cause quite high heat in the motor wire coils and trigger a current break. This occurs due to heat accumulating in the motor system. So repeated incidents within a short period of time can result in damage to the coils and other motor components. To overcome this, a Variable Frequency Drive (VFD) is used which works by periodically increasing the voltage frequency so that it is able to turn off the current at start up time intervals or is called the Soft Starting method on motors. The VFD modeling design is carried out based on the SPWM topology with the output parameters of current rotation, THD and reactive power. Test results show that motor performance using a VFD is able to reduce current to 110% from previously 620%, reduce Total Harmonic Distortion (THD) from 5.01% to 3.54%, and reduce motor reactive load from 14.31 kVar to 8 kVar with capacitance value $121.78\pi F$.

Abstrak – Ketika proses *starting up*, motor induksi memiliki arus *starting* yang cukup tinggi, bahkan bisa mencapai empat hingga delapan kali arus nominal motor. Arus awal yang cukup besar dan berulang-ulang dalam waktu singkat dapat menimbulkan panas yang cukup tinggi pada gulungan kawat motor dan memicu pemutusan arus. Hal ini terjadi karena adanya panas yang terakumulasi pada sistem motor. Sehingga kejadian yang berulang dalam interval waktu singkat bisa mengakibatkan kerusakan pada gulungan dan komponen motor lainnya. Untuk mengatasi hal ini digunakan *Variable Frequency Drive* (VFD) yang bekerja dengan meningkatkan frekuensi tegangan secara berkala sehingga mampu meredam lonjakan arus pada interval waktu *starting up* atau disebut Metode *Soft Starting* pada motor. Desain pemodelan VFD dilakukan berdasarkan topologi SPWM dengan parameter output lonjakan arus, THD dan daya reaktif. Hasil pengujian menunjukkan performa motor dengan penggunaan VFD mampu meredam lonjakan arus menjadi 110% dari yang sebelumnya mencapai 620%, meredam Total Harmonic Distortion (THD) dari 5.01% menjadi 3.54% dan mengurangi beban reaktif motor dari 14.31 kVar menjadi 8 kVar dengan nilai kapasitansi $121.78\pi F$.

Keywords – VFD, SPWM, Motor Starting, THD.

PENDAHULUAN

Perusahaan manufaktur industri menggunakan komponen motor induksi menjadi alat penggerak utama pengoperasian pabrik. Ketika proses *starting up*, motor induksi memiliki arus *starting* yang cukup tinggi bahkan bisa mencapai empat hingga delapan kali arus nominal motor. Tidak ada standarisasi khusus mengenai *starting*

motor, namun semakin rendah lonjakan arus semakin baik kualitas daya sistem kelistrikan pada motor. Arus awal yang cukup besar dan berulang-ulang dalam waktu singkat dapat menimbulkan panas yang cukup tinggi pada gulungan kawat motor dan memicu pemutusan arus. Hal ini terjadi karena adanya panas yang terakumulasi pada sistem motor. Sehingga kejadian yang berulang dalam interval

waktu singkat bisa mengakibatkan kerusakan pada gulungan dan komponen motor lainnya [1].

Beberapa faktor yang melatarbelakangi terjadinya lonjakan arus yaitu beberapa perangkat atau sistem yang terdiri dari kapasitor *decoupling* atau kapasitor halus, menarik sejumlah besar arus saat mulai mengisinya. Pada motor berdaya besar khususnya motor induksi 3 fasa membutuhkan arus *starting* yang besar seiring dengan daya motor yang besar, sehingga tidak dianjurkan untuk menghidupkan motor secara langsung tanpa menggunakan metode-metode pengasutan. Pada jaringan *direct line*, kondisi ini juga menyebabkan ketidakstabilan putaran motor induksi hingga meningkatkan *Total Harmonic Distortion* (THD). THD yang tinggi menyebabkan menurunnya faktor daya hingga berimbas pada tingginya pengeluaran biaya konsumsi energi listrik perusahaan. Hal ini tentu sangat tidak diharapkan terjadi [1], [2].

Mengatasi hal ini digunakan beberapa metode untuk meredam lonjakan daya, diantaranya *Direct On Line Starter* (DOL), *Star Delta*, *Rheostat Starter* dan *Voltage Control Starter*. Penggunaan DOL sering diterapkan pada motor induksi karena penggunaan yang lebih praktis namun dari segi fleksibilitas, metode ini hanya mampu meredam lonjakan daya hingga 200% dan kekurangan lainnya adalah semakin tinggi beban pada motor maka semakin rendah efisiensi penggunaan metode ini. Hal ini mengharuskan Metode DOL hanya bekerja secara efisien pada motor dengan beban yang rendah. beban motor mengkonsumsi daya lebih banyak untuk melakukan *re-starting up* [2].

Penggunaan Metode *Star Delta* juga banyak diterapkan pada industri manufaktur. Lonjakan arus pada *Star Delta Starter* bisa mencapai satu pertiga kali dari arus lonjakan Metode DOL. Metode *starter* ini mengurangi lonjakan arus dan torsi dengan memanfaatkan gulungan stator yang hanya menerima tegangan satu per akar tiga dari *voltage line*, sehingga arus dan torsi yang dihasilkan akan lebih kecil dari Metode DOL [3].

Metode lainnya yaitu *Rheostat* memiliki efisiensi lebih tinggi dari segi penggunaan. Metode ini menempatkan tiga buah resistor yang ditempatkan secara seri dengan belitan *stator* selama pengoperasian awal atau pada saat *start* sehingga terjadi redaman arus. Kekurangan dari metode ini adalah resiko terjadinya *low voltage* pada jaringan motor induksi sehingga penerapannya perlu diperhitungkan dengan sangat matang [3]. Metode

Voltage Control menjadi solusi yang baik untuk mengatasi kestabilan tegangan dan arus pada saat *starter*. Terdapat tiga Metode *voltage control* yang biasa diterapkan pada motor induksi tiga fasa, yaitu *Autotransformer*, *Soft Starter* dan *Variable Frequency Drive* (VFD) *Starter*. Diketahui bahwa Metode *voltage control* memiliki slip dan torsi paling rendah diantara metode yang lain pada keadaan tanpa beban maupun berbeban. Diantara ketiga metode yang ada, penggunaan VFD memiliki efisiensi yang paling baik serta dilengkapi dengan perangkat proteksi dan kemampuan mengatur kecepatan rotasi rotor [4].

VFD bekerja dengan cara mengatur nilai tegangan suplai secara berkala menggunakan perangkat *microcontroller* dengan mengatur frekuensi tegangan suplai. Peningkatan frekuensi secara berkala ini menyebabkan peredaman medan magnet yang dibutuhkan motor untuk melakukan *starting* sehingga lonjakan arus dapat diredam. Perangkat ini mampu mengurangi THD dengan mengatur kecepatan dan frekuensi motor dengan bantuan inverter. VFD mengatur kecepatan putar motor berdasarkan pasokan daya yang diterima dari *mainline*. Apabila terjadi *voltage drop* pada sistem VFD akan menginjeksikan daya pada motor. Jika terjadi ketidakstabilan tegangan, VFD akan menyesuaikan gelombang sinus AC agar beban tetap terjaga. Namun apabila terjadi hubung singkat, *overcurrent relay* akan mendeteksi dan beban motor akan ditanggung oleh inverter 100%. Hal ini berimplikasi pada pengurangan resiko peningkatan THD pada saat *starting up* dan menjaga kualitas daya [5].

Terdapat beberapa jenis metode VFD yang tersedia dipasaran, diantaranya *Voltage Source Inverter*, *Current Source Inverter* dan *Sinusoidal Pulse-Width Modulation* (SPWM). Setiap metode memiliki kelebihan masing-masing namun yang paling umum digunakan adalah *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM). SPWM memiliki karakteristik dimana *duty cycle* dari pulsa meningkat secara gradual dan menurun secara gradual dalam deretan pulsa proporsional terhadap nilai sudut sinus dalam setengah gelombang sinus [6], [7].

Implementasi SPWM telah banyak digunakan karena memiliki ketahanan *noise* yang tinggi dan tanpa fluktuasi tegangan jika dibandingkan dengan kedua metode lainnya. Namun sinyal SPWM tiga fasa secara digital sulit dibandingkan dengan keterbatasan fitur mikrokontroler yang ada. *Arduino UNO* adalah mikrokontroler yang terspesifikasi

untuk keperluan pengontrolan motor dengan fitur khusus untuk penggunaan sinyal SPWM tiga fasa diantaranya pengaturan *dead time*, *complementary mode* dan *centralign mode* [6].

Permasalahan yang disebabkan oleh *starting* motor berlebih pernah terjadi pada pabrik pengolah tisu PT Pindo Deli Perawang, dengan daya 22kW. Perusahaan ini menggunakan Metode *Direct On Line Starter* sebagai solusi peningkatan performa motor induksi, dari hasil pengukuran performa operasi motor dapat dilihat karakteristik arus dan torsi *starting* yang dihasilkan motor induksi sebesar 4,26A atau sebesar 7,4 kali arus nominal serta nilai THD yang tidak memenuhi standar IEEE yaitu dibawah 5%. Dalam upaya meningkatkan keberlanjutan performa motor pada perusahaan, peneliti mencoba mengembangkan metode *starting* motor menggunakan solusi terbaru *Variable Frequency Drive* (VFD).

Penelitian tentang penggunaan *voltage control* VFD sebagai metode pengatur kecepatan motor induksi pernah dilakukan pada penelitian [8] yang melakukan analisis *power factor* penggunaan VFD satu fasa pada mesin *Sewing*. Penelitian VFD pada mesin *sewing* dibutuhkan untuk mengatur kecepatan rotor pada kajian mekatronika mesin. Perubahan kecepatan motor menghasilkan cacat gelombang yang berpengaruh pada *power factor* mesin sehingga analisis perhitungan kapasitansi kapasitor dilakukan pada penelitian ini untuk pengoperasian tiga fasa perlu dilanjutkan.

Penelitian [6] dan [7] melakukan pengujian performa VFD pada motor induksi tiga fasa dengan topologi *Voltage Source Inverter*. Topologi ini memiliki kelebihan yaitu menghasilkan gelombang sinus yang lebih jernih bahkan tanpa filter pasif maupun aktif. Namun penggunaan metode ini pada beban yang tinggi perlu diperhitungkan. Penelitian [9] dan [10] menjadi solusi untuk mengatasi kekurangan ini. Penelitian [9] merancang VFD dengan metode *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM). Metode ini memungkinkan untuk mengatur gelombang output AC yang disuplai pada beban dengan memanfaatkan *microcontroller*. Penelitian [9] menggunakan STM32 sebagai modul pembangkit sinyal PWM dan diaplikasikan pada motor induksi satu fasa dan penelitian [10] menggunakan DsPIC sebagai modul pembangkit sinyal PWM tiga fasa.

Penelitian melanjutkan penelitian [10] yang sebelumnya merancang VFD dengan Metode SPWM untuk pembebanan motor induksi tiga fasa

namun peneliti berfokus pada performa motor induksi tiga fasa sebelum dan setelah penggunaan VFD lalu analisis *Total Harmonic Distortion* (THD) dan faktor daya yang dihasilkan yang sebelumnya tidak dibahas pada penelitian [10], serta menggunakan modul yang berbeda yaitu *Arduino Uno*. Penelitian juga meredam harmonisa yang mana harmonisa merupakan komponen sinusoidal dari sebuah gelombang periodik yang memiliki frekuensi kelipatan bulat dari fundamental frekuensi gelombang periodik tersebut [11]. *Arduino* merupakan *microcontroller* sederhana yang bisa mudah dipahami maka itu dipilih sebagai modul pada penelitian [12]. Penelitian dimulai dari pemodelan VFD dengan topologi SPWM, pengaturan kecepatan *starting motor*, perbandingan performa motor sebelum dan sesudah penggunaan VFD serta *Total Harmonic Distortion* (THD).

METODE

Variable Frequency Drive (VFD) merupakan alat pengatur kecepatan motor dengan cara memperbesar atau memperkecil frekuensi gelombang AC yang dipancarkan dengan batuan *thyristor*. Komponen ini bekerja dengan cara membuka dan menutup aliran listrik dengan frekuensi tinggi dan di program menggunakan bahasa pemrograman yang diakses pada Mikrokontroler [13].

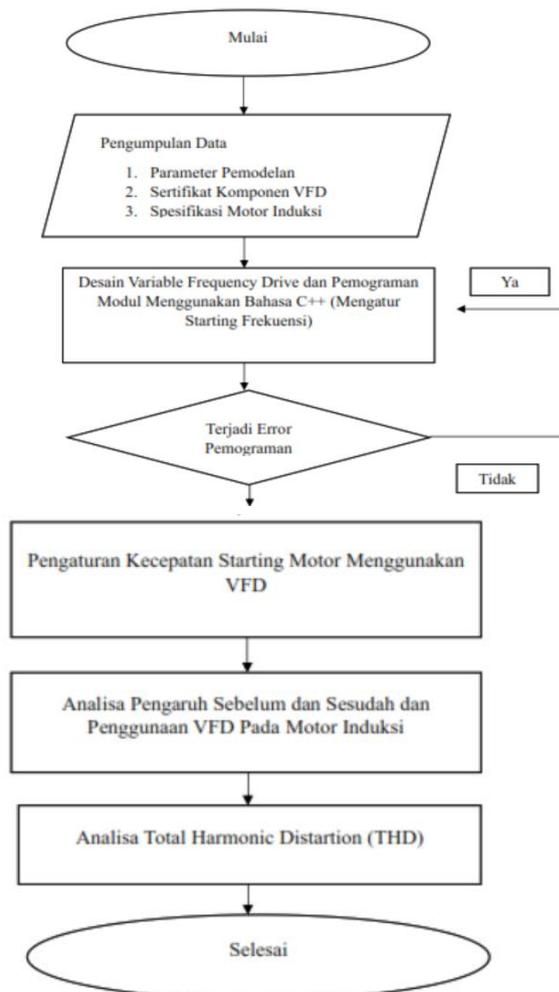
Dibutuhkan dua *thyristor* untuk membentuk satu gelombang penuh, dimana jika *thyristor* sisi atas hidup dan sisi bawah mati akan membentuk puncak. Sebaliknya, jika *thyristor* sisi bawah hidup dan sisi atas mati akan membentuk lembah yang dikenal sebagai *lambda* atau satu gelombang penuh. Keadaan ini kemudian dimanfaatkan untuk mengatur ukuran *lambda* dari ukuran lebar hingga mengecil secara berkala (disesuaikan dengan waktu *starting* yang kita inginkan) dengan mengatur jeda hidup-mati *thyristor*. Semakin kecil ukuran *lambda* maka semakin tinggi frekuensi suplai yang dihasilkan. Metode ini disebut dengan *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) [9].

Gelombang keluaran hasil SPWM kemudian dikonversi menjadi 220V menggunakan trafo *step up* dan cacat gelombang yang dihasilkan dari proses peningkatan gelombang diredam menggunakan filter sehingga menghasilkan gelombang keluaran yang mendekati sempurna [8].

Gelombang tegangan yang dihasilkan dari proses ini menjadi input pada motor untuk menjalankan

starting up. Dengan mengatur suplai tegangan secara berkala maka torsi motor juga meningkat secara berkala dan stabil pada interval waktu yang kita setting di program mikrokontroler. Keadaan ini yang menyebabkan VFD mampu meredam lonjakan daya pada motor [8].

Penelitian ini menggunakan metode desain dan analisis eksperimental dengan cara melakukan pemodelan *driver inverter* pada aplikasi proteus 8 sebagai pengatur kecepatan *starting* motor tiga fasa yang terpasang secara *direct*. Kemudian hasil pemodelan diterapkan pada aplikasi ETAP untuk menguji performa motor dengan parameter kecepatan, lonjakan arus, lonjakan daya dan harmonisa sebelum dan setelah penggunaan VFD pada motor. Gambar 1 adalah *flowchart* penelitian.



Gambar 1. *Flowchart* Penelitian

Pengumpulan Data

Parameter Pemodelan

Desain VFD pada penelitian ini dirancang untuk mengatur kecepatan *starting* motor meningkat secara berkala selama 4s mencapai kecepatan maksimal motor 1500rpm pada frekuensi 50Hz. Parameter desain pemodelan ditampilkan dalam bentuk Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Pemodelan VFD

| Komponen | Parameter Pemodelan |
|----------------------|---|
| <i>Transistor</i> | Mampu bekerja pada frekuensi tinggi, dan sumber tegangan 5V |
| <i>Gate Driver</i> | Memiliki sumber tegangan yang sama dengan modul PWM dan transistor |
| Modul PWM | Modul PWM yang dipilih memiliki kapasitas untuk membangkitkan sinyal PWM |
| <i>Transformator</i> | Jenis trafo yang digunakan adalah <i>step up</i> untuk mencapai tegangan 220V |
| <i>Filter</i> | <i>Filter</i> yang dibutuhkan adalah <i>filter</i> yang mampu memblokir sinyal tegangan tinggi sehingga membentuk sinyal <i>output</i> sinusoidal |

Spesifikasi Komponen VFD

Spesifikasi komponen VFD menggunakan data sekunder serta pengolahan secara mandiri berdasarkan parameter yang ditentukan. Tabel 2 adalah data spesifikasi VFD.

Tabel 2. Spesifikasi Komponen VFD

| Komponen | Jenis | Kapasitas |
|----------------------|------------------|-----------------------------|
| <i>Transistor</i> | MOSFET IRF460 | 500Hz, 5 – 100VDC |
| <i>Gate Driver</i> | FAN7392N | Input 5VDC |
| Modul PWM | Arduino- UNO | 13 Pin O/I |
| <i>Transformator</i> | Trans-AC | Induktansi 0.5H, 400V |
| <i>Filter Gate</i> | AC Gate | Diode, R = 1 ohm |
| <i>Filter VFD</i> | Low Pass Filter | L=0.5H, C=10uF, R=1k ohm |

Spesifikasi Motor Induksi

Spesifikasi motor induksi tiga fasa menggunakan data sekunder, lalu kemudian performa motor dibandingkan sebelum dan setelah penggunaan VFD. Spesifikasi motor ditampilkan Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi Motor Tiga Fasa

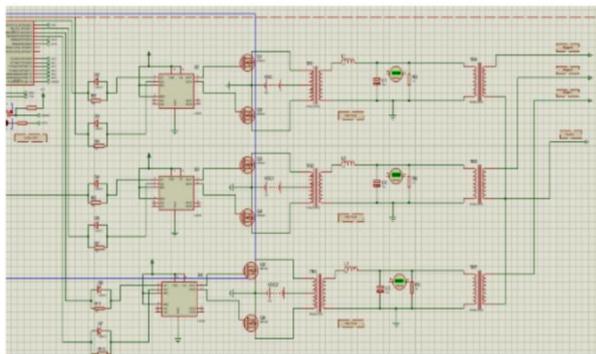
| | |
|-----------------------|-------|
| Beban (W) | 23000 |
| Kecepatan Rotor (RPM) | 1425 |
| Slip (%) | 5 |
| Pf | 85 |
| Tegangan Bus (V) | 380 |
| Arus (A) | 41.16 |
| FLA Starting (%) | 620 |
| THD (%) | 5.01 |

Desain Variable Frequency Drive dan Pemrograman Setting Frekuensi

Desain Variable Frequency Drive

Variable Frequency Drive (VFD) merupakan jenis inverter yang berfungsi mengatur kecepatan putar rotor dengan mengendalikan frekuensi duty cycle. Penelitian ini merancang inverter untuk mengatur kecepatan putar motor tiga fasa pada saat proses starting up hingga berputar pada frekuensi tetap berdasarkan topologi Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM). Perancangan dimulai dari membuat rangkaian penyearah pada masing-masing fasa R, S dan T. Berdasarkan metode pembangkitan sinyal AC jembatan penuh menggunakan mosfet, dilakukan pembuatan rangkaian dengan sumber tegangan 12 Volt DC [14], [15].

Pemodelan VFD dilakukan menggunakan software proteus 8 berdasarkan yang sudah ditentukan. Masing-masing kaki input gate driver dihubungkan pada modul Arduino melalui pin 3,5,6,9,10 dan 11 yang mampu menghasilkan sinyal PWM. Rangkaian Variable Frekuensi Drive (VFD) tiga fasa dirangkai berdasarkan topologi Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) untuk menghasilkan gelombang penuh 360°, dimana masing-masing kaki memiliki satu Gate Driver serta perbedaan sudut antar fasa didesain pada 120° menggunakan Bahasa pemrograman C++ pada software Proteus. Gambar 2 adalah tampilan inverter berdasarkan topologi SPWM.



Gambar 2. Topologi SPWM

Spesifikasi SPWM yang dirancang berdasarkan gambar 2 dijelaskan sebagai berikut, (1) Sumber tegangan arus AC digunakan untuk suplai komponen microcontroller sebesar 5V pada masing-masing fasa, (2) Microcontroller Arduino-Uno digunakan untuk pembangkitan sinyal SPWM karena memiliki fitur sesuai kebutuhan, (3) Filter Gate yang terletak antara Arduino dan Gate Driver dibutuhkan untuk menghilangkan arus charge sehingga kedua komponen bekerja dengan maksimal, (4) FAN7392N digunakan sebagai gate driver karena memiliki kapasitas tegangan yang sama dengan Arduino yaitu 5V, (5) MOSFET tipe IRF460 digunakan sebagai transistor karena memiliki delay on dan off yang singkat sehingga dapat digunakan untuk pembangkitan sinyal AC 50Hz tiga fasa yaitu sebesar 3.3ms delay.

Pemrograman Modul Arduino Menggunakan Bahasa C++

Arduino digunakan sebagai pembangkit sinyal AC dengan mengatur frekuensi kaki mosfet sehingga terbentuk voltase yang memiliki frekuensi dan periode. Arduino di program untuk membangkitkan sinyal pada satu fasa R, S dan T agar menghasilkan tegangan AC 220V. Pembangkitan sinyal dilakukan dengan bahasa program sederhana namun mengacu pada pembentukan satu gelombang penuh pada frekuensi 50Hz. Jika satu satuan waktu (1s) memiliki 50 gelombang (50 λ), maka perhitungan periode dinyatakan pada persamaan (1), [5].

$$P = \frac{1}{f} \tag{1}$$

$$P = \frac{1s}{50 \lambda}$$

$$P = \frac{1000 ms}{50 \lambda}$$

$$P = 20ms$$

Dimana:

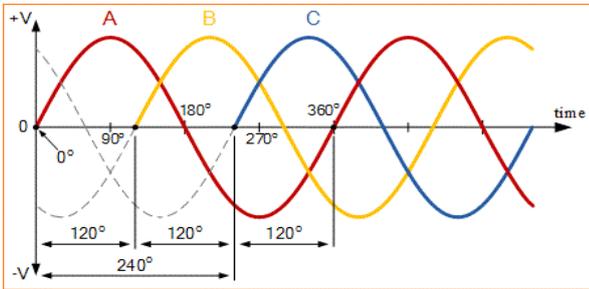
P = Periode satu gelombang penuh

f = Frekuensi gelombang

Dari persamaan (1) dihasilkan periode satu gelombang penuh adalah sebesar 20ms untuk gelombang 50Hz. Sehingga untuk membentuk setengah gelombang Arduino dioperasikan secara bergantian membentuk V+ dan V- dengan durasi delay 10ms. Fasa S dan T di desain dengan metode yang sama namun terdapat perbedaan pada sudut fasa. Perbedaan sudut antara fasa R dan S sebesar 120° begitu juga dengan S dan T, sehingga waktu delay Arduino yang berbeda perlu diterapkan.

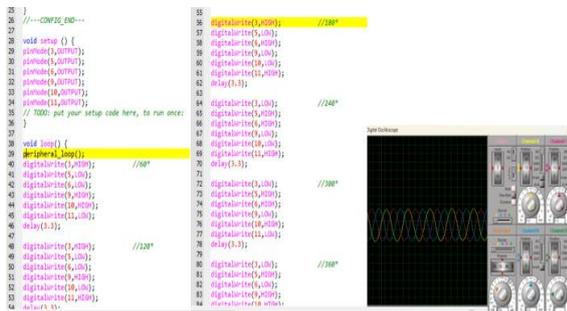
Derajat satu fasa gelombang penuh adalah senilai 360°, yang mana ini setara dengan 20ms periode atau 10ms pada setengan gelombang. Berikut grafik perbedaan tegangan antar fasa.

Ketika fasa R (gelombang A) membentuk sudut 120°, fasa S mulai membentuk sinyal positif. Ini terjadi ketika periode fasa R berada pada 6.7ms. Bertepatan dengan itu pula fasa T (gelombang C) hampir mencapai gelombang puncak negatif pada sudut 150°.



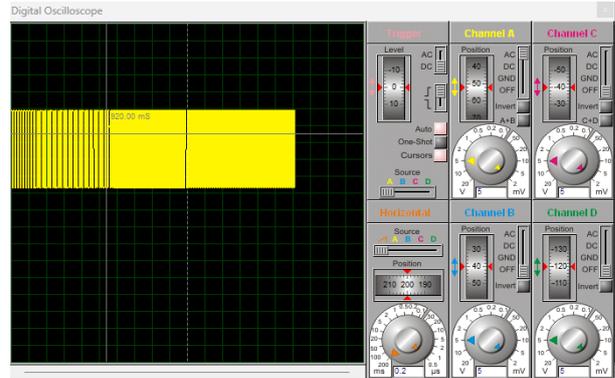
Gambar 3. Perbedaan Gelombang 3 Fasa

Dilihat berdasarkan grafik pada Gambar 3, perbedaan tegangan antar fasa, terdapat tiga perbedaan kondisi pada masing-masing gelombang. Jika setengah gelombang memiliki 10ms periode, maka masing-masing gelombang akan diberikan 3.3ms delay untuk setiap void loop yang terjadi. Dimana setiap void loop mengimplikasikan keadaan setiap 60°. Keadaan ini kemudian dinyatakan ke dalam bahasa program Arduino pada software proteus 8.



Gambar 4. Pemrograman Setting Frekuensi dan Tampilan Gelombang 3 Fasa Keluaran VFD

Perbedaan sudut antar fasa didesain agar memiliki perbedaan 120° atau setara dengan delay 3ms. Artinya setiap 3ms terjadi perubahan tegangan V+ dan V- hingga membentuk sinyal sinusoidal yang ideal.



Gambar 5. Gelombang Hasil Keluaran Program VFD Pemrograman berhasil yang mana tampak dari hasil pemrograman berupa gelombang yang mana frekuensi motor naik secara bertahap dan ketika detik ke 5 stabil sesuai dengan yang diharapkan.

Pengaturan Kecepatan Starting Motor Menggunakan VFD

VFD bekerja sebagai metode *soft starting* motor induksi tiga fasa dengan cara mengatur *voltase* tegangan *input* motor. *Voltase* tegangan diatur dengan membentuk durasi frekuensi hingga mencapai 50Hz secara bertahap. Frekuensi satu gelombang penuh memiliki 50% *duty cycle*, dimana pada frekuensi 50Hz memiliki 10ms periode pada V+ dan 10ms periode pada V-. Pada motor AC, semakin lebar *duty cycle* maka semakin lambat putaran poros rotor [14]. Hal ini sebabkan karena jaringan listrik AC memanfaatkan frekuensi tegangan suplai untuk memutar rotor. Jika dibandingkan dengan motor DC, motor DC akan semakin cepat jika *duty cycle* semakin lebar. Hingga pada puncaknya terjadi pada 100% *duty cycle* yang membentuk jaringan listrik searah tanpa frekuensi.

Penelitian ini merancang pemrograman kecepatan motor pada kondisi *starting up* dengan memanfaatkan pengaruh *duty cycle* terhadap frekuensi jaringan AC. Dimana 50% *duty cycle* memiliki nilai satu periode atau 20ms. Jika pada 100% *duty cycle* menunjukkan kondisi mati pada motor dan 50% *duty cycle* menghasilkan nyala motor pada frekuensi 100%, maka saat motor menyala 25% perhitungan dengan persamaan (2).

Delay 25% frekuensi

$$= (100\% - \left(\frac{1}{4}(50\%)\right)) \times 20ms \tag{2}$$

$$= 17.5ms$$

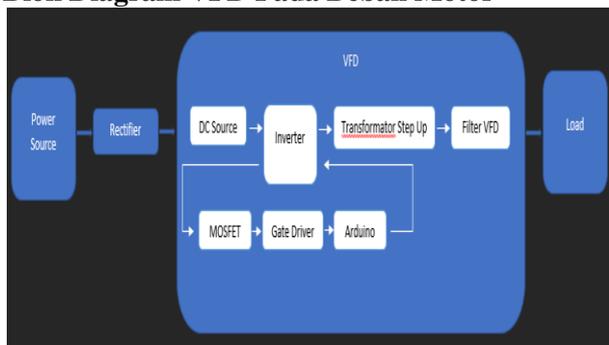
Persamaan yang sama juga dapat diterapkan pada frekuensi motor berikutnya hingga mencapai 100% frekuensi 50Hz. Tidak ada standarisasi khusus

mengenai frekuensi *starting motor*, pada penelitian ini dilakukan pemodelan frekuensi *starting* secara berkala selama 4s. Sehingga dalam 1s terjadi peningkatan frekuensi sebesar 25%. Parameter yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4

Tabel 4. Parameter *Setting* VFD

| Frekuensi (%) | Frekuensi (Hz) | Delay (ms) | Waktu <i>Starting</i> (s) |
|---------------|----------------|------------|---------------------------|
| 25 | 12.5 | 17.5 | 1 |
| 50 | 25 | 15 | 2 |
| 75 | 37.5 | 12.5 | 3 |
| 100 | 50 | 10 | 4 |

Blok Diagram VFD Pada Beban Motor



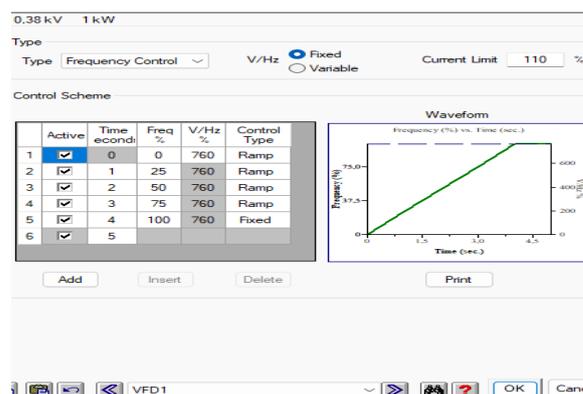
Gambar 6. Blok Diagram Penggunaan VFD

VFD merupakan jenis inverter yang bekerja mengatur kecepatan motor menggunakan modul pemrograman. Dimulai dari *supply* sumber tegangan, arus diubah dari AC menjadi DC pada voltase 12V. Kemudian inverter yang terdiri dari tiga komponen utama yaitu MOSFET, *Gate Driver* dan Modul Pemrograman *Arduino* bekerja mengatur frekuensi *staring up* motor dengan *output* gelombang AC 12V. Tegangan ini kemudian dikonversi menjadi 220V menggunakan transformator *step up*. Untuk mendapatkan spektrum gelombang keluaran sinusoidal yang mendekati sempurna diperlukan filter VFD yang sekaligus bekerja sebagai kompensator penyumbang daya reaktif untuk beban.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan VFD sebagai metode *starting up* lalu diuji menggunakan motor induksi tiga fasa dengan beban 23kW. Kemudian pengujian dilakukan untuk melihat pengaruh penggunaan VFD pada motor ketika proses *starting up* sebelum dan setelah penggunaan VFD pada nilai beban yang sama.

Penggunaan VFD Pada Motor Tiga Fasa



Gambar 7. *Setting* Frekuensi dan Time VFD

Penggunaan VFD sebagai pengatur frekuensi dilakukan dengan parameter frekuensi dan waktu yang telah didesain. Parameter tegangan per frekuensi ditentukan berdasarkan tegangan input 380V dibagi frekuensi 50Hz dikali 100%, maka dihasilkan 760V/Hz%. Pada satu detik pertama motor diberikan 25% frekuensi total, detik kedua menjadi 50%, detik ketiga 75%, lalu detik keempat 100% kemudian stabil pada frekuensi 50Hz. Berikut adalah nilai dari kecepatan sinkron yang dihasilkan berdasarkan parameter slip persamaan (1) dan (2).

$$N_s = \frac{120 \cdot F}{P}$$

$$N_s = \frac{120 \times (\frac{25}{100})50}{4}$$

$$N_s = 375 \text{ rpm}$$

Dengan diketahui slip motor = 5%, maka kecepatan rotor dapat ditentukan dengan persamaan (3).

$$Slip = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \tag{3}$$

$$5\% = \frac{375 - N_r}{375} \times 100\%$$

$$375 - N_r = 18.75$$

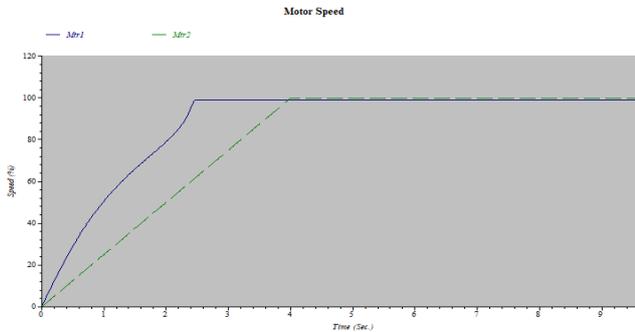
$$N_r = 356 \text{ rpm}$$

Persamaan yang sama juga diterapkan pada kecepatan 50%, 75%, dan 100% dari frekuensi 50Hz. Hasil perhitungan disajikan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Kecepatan Motor Tiga Fasa Berdasarkan Peningkatan Frekuensi VFD

| Frekuensi (%) | Frekuensi (Hz) | Kecepatan Stator (rpm) | Kecepatan Rotor (rpm) |
|---------------|----------------|------------------------|-----------------------|
| 25 | 12.5 | 375 | 356 |
| 50 | 25 | 750 | 713 |
| 75 | 37.5 | 1125 | 1069 |
| 100 | 50 | 1500 | 1425 |

Hasil pada Tabel 5 kemudian divalidasi pada *software* dalam bentuk grafik di Gambar 8.

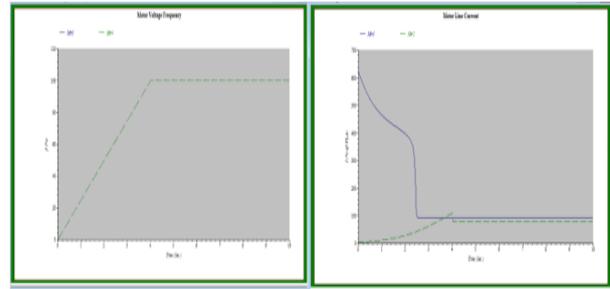


Gambar 8. Grafik Kecepatan Motor Tiga Fasa

ID Mtr 1 merupakan motor tanpa VFD dan ID mtr2 menggunakan VFD. Terjadi peningkatan secara berkala pada mtr2 lalu kemudian stabil pada 100% rpm. Jika dibandingkan dengan mtr1, kondisi *starting* pada mtr2 terlihat lebih jernih dengan frekuensi yang meningkat secara bertahap per satuan waktu. Grafik ini menunjukkan bahwa penggunaan VFD pada motor menghasilkan peningkatan kecepatan motor secara berkala sehingga menjaga keberlangsungan dan daya tahan motor.

Perbandingan Lonjakan Arus Sebelum dan Sesudah Penggunaan VFD

Lonjakan arus umumnya terjadi pada motor induksi saat *starting up*. Hal ini disebabkan karena adanya beberapa komponen medan magnet yang menarik arus dalam jumlah yang besar. Dengan mengontrol frekuensi tegangan input, lonjakan arus dapat dikurangi. Hal ini disebabkan karena peningkatan medan magnet diatur secara berkala dalam satu periode *starting*. Berikut adalah tampilan frekuensi perbandingan lonjakan arus sebelum dan setelah penggunaan VFD.



Gambar 9. Grafik Lonjakan Arus Starting Motor

Motor 2 yang dikontrol dengan VFD tetap menghasilkan lonjakan arus namun tidak sebesar Motor 1 dan lebih stabil. Motor 1 bahkan membutuhkan arus hingga 620% untuk melakukan *starting up*. Dengan melakukan penyetelan frekuensi *starting*, arus *starting* yang dihasilkan dapat diredam dengan baik meskipun masih memiliki sedikit lonjakan. Dengan demikian metode *soft starting* yang digunakan mengurangi potensi *over current* ketika proses *starting-up* pada motor. Arus yang dibutuhkan motor induksi persatuan waktu dapat dihitung dengan persamaan (4), [15].

$$I_{nominal} = FLA \times I \tag{4}$$

Dimana:

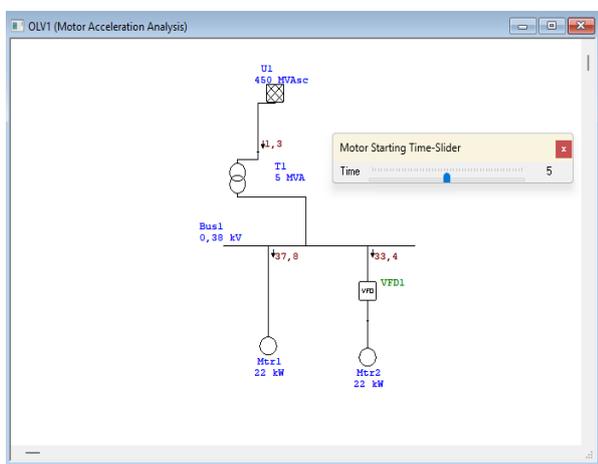
- $I_{nominal}$ = Arus Nominal (A)
- FLA = Full Load Ampere (%)
- I = Arus (A)

Persamaan (4) kemudian digunakan untuk membandingkan lonjakan arus sebelum dan setelah penggunaan VFD. Berikut disajikan hasil lonjakan arus sebelum dan setelah penggunaan VFD dalam bentuk Tabel 6.

Tabel 6. Lonjakan Arus Starting Sebelum dan Setelah Penggunaan VFD

| Sebelum Penggunaan VFD | | | Setelah Penggunaan VFD | | |
|------------------------|---------|------------------|------------------------|---------|------------------|
| Detik (s) | FLA (%) | Arus Nominal (A) | Detik (s) | FLA (%) | Arus Nominal (A) |
| 0 | 620 | 254.2 | 0 | 0 | 0 |
| 0.5 | 500 | 205.8 | 1 | 10 | 4.1 |
| 1.0 | 460 | 188.6 | 2 | 30 | 12.3 |
| 1.5 | 420 | 172.2 | 3 | 70 | 28.7 |
| 2.0 | 400 | 164.6 | 4 | 110 | 45.1 |
| 2.5 | 90 | 37 | 5 | 80 | 33 |

Perhitungan diatas kemudian divalidasi dengan membuat *line* diagram sederhana menggunakan ETAP. Tegangan bersumber dari *supply* 45kW kemudian mengalir melalui *trafo step down* pada bus 1. Bus 1 di bagi menjadi dua *line* yang mana kiri adalah motor 23kW tanpa VFD dan kanan menggunakan VFD dengan spesifikasi motor yang sama. Gambar 10 adalah tampilan *single line* diagram pada ETAP.



Gambar 10. Simulasi Arus *Starting* Motor Induksi

Pengaruh VFD pada Daya Reaktif

Daya reaktif pada motor induksi tiga fasa dibutuhkan untuk membangkitkan kumparan medan magnet [16]. VFD yang memiliki komponen kapasitif dapat berperan sebagai penyumbang daya reaktif untuk kebutuhan motor induksi. Perhitungan pengaruh VFD sebagai penyumbang daya reaktif dilakukan secara manual lalu disimulasikan dengan *software* ETAP.

Perhitungan Daya Semu (S)

Daya semu pada motor induksi tiga fasa dapat ditentukan dengan persamaan (5), [16].

$$S = V \times I \times \sqrt{3} \tag{5}$$

$$S = 380V \times 41.16A \times \sqrt{3}$$

$$S = 27,090.6 VA$$

Dimana:

S = Daya Semu (VA)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

Perhitungan Daya Reaktif (Q)

Berdasarkan segitiga daya, daya reaktif dapat ditentukan melalui persamaan berikut (6), [14].

$$Q^2 = S^2 - P^2 \tag{6}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$Q = \sqrt{27,090.6 VA^2 - 23,000W^2}$$

$$Q = \sqrt{733,900,608.36 VA - 529,000,000W}$$

$$Q = \sqrt{204,900,608.36}$$

$$Q = 14,314.34 VAr$$

Dimana:

S = Daya Semu (VA)

P = Daya Aktif (kW)

Q = Daya Reaktif (VAr)

Menentukan Nilai Kapasitansi Q_C

Kapasitansi Q_C adalah nominal daya reaktif yang harus ditutupi kapasitor untuk perbaikan faktor daya system dari 0.85 menjadi 0.95. Nilai Q_C dapat ditentukan dengan persamaan (7).

$$Q_C = P (\tan \theta \text{ awal} - \tan \theta \text{ akhir}) \tag{7}$$

$$Q_C = 23000W \times (\tan 30^\circ - \tan 18^\circ)$$

$$Q_C = 23000W \times (0.57 - 0.33)$$

$$Q_C = 23000W \times 0.24$$

$$Q_C = 5.52 kVar$$

Menentukan nilai kapasitansi kapasitor (C)

Dengan diketahui sebelumnya bahwa nilai $Q_C = 5.52kVar$, maka nilai X_C dapat ditentukan dengan persamaan (8).

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} \tag{8}$$

$$X_C = \frac{380^2}{5.52kVar}$$

$$X_C = 26.15 \Omega$$

Dengan demikian kapasitansi kapasitor dapat dihitung dengan persamaan (9).

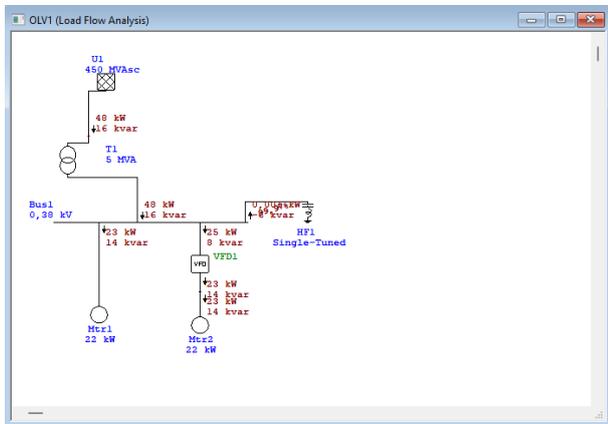
$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \tag{9}$$

$$C = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 50Hz \times 26.15 \Omega}$$

$$C = \frac{1}{8211.1}$$

$$C = 121.78\pi F$$

Kapasitansi kapasitor kemudian diinputkan ke dalam settingan VFD pada *single line* sederhana yang dirancang sebelumnya dan penambahan *filter* pada bus yang sama dengan *line* VFD, Hasil perhitungan kemudian disimulasikan pada *software* ETAP dengan input nilai kapasitor yang dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Simulasi Pengujian Daya Reaktif Motor Tiga Fasa

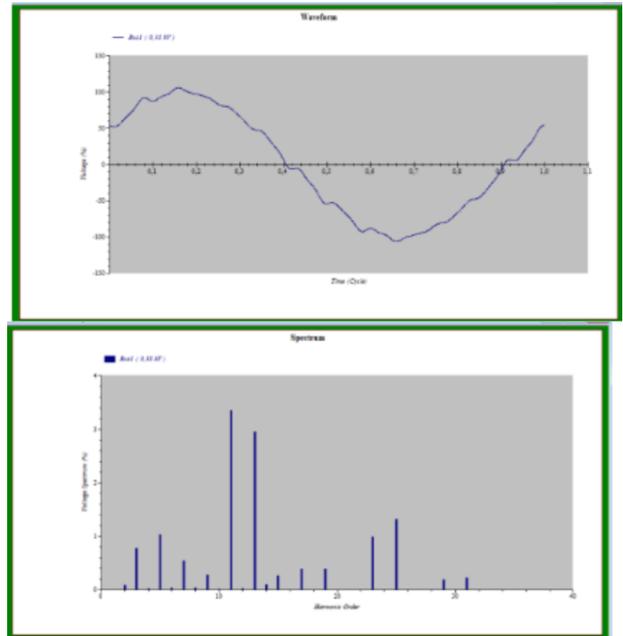
Dengan melakukan perbaikan *power factor* dari 0.85 menjadi 0.95 terlihat bahwa kapasitansi pada VFD mampu menutupi daya reaktif sebesar 5.5 kVar dari yang sebelumnya 14 kVar menjadi 8 kVar pada motor 2 dengan beban kerja yang sama yaitu 23kW.

Filter VFD sebagai Peredam Harmonisa

Bentuk gelombang catu daya AC yang ideal adalah gelombang sinus murni 50Hz atau 60Hz tanpa *noise*. Namun hal ini sulit diterapkan karena beban yang digunakan memberikan efek distorsi pada gelombang AC yang disebut *Total Harmonic Distortion* (THD). Pada bagian ini ditentukan nilai induktansi komponen filter sebagai upaya peredam harmonisa. Gambar 12 merupakan gelombang dan *spectrum* motor tiga fasa yang terbentuk sebelum penggunaan VFD.

Pada frekuensi dasar 50 Hz, harmonisa kedua terjadi pada gelombang kedua dengan frekuensi sebesar 100 Hz, harmonisa ketiga adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 150 Hz dan seterusnya. Gelombang-gelombang ini kemudian menumpang pada gelombang murni atau aslinya sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmonisanya, seperti tabel *spectrum* motor tiga fasa bahwa harmonisa tertinggi terjadi pada orde ganjil yaitu orde 11 dan 13. Filter VFD di desain untuk mampu menutupi harmonisa tertinggi yang terjadi

pada motor induksi tiga fasa dengan beban 23kW. Berikut langkah-langkah perhitungannya [13].



Gambar 12. Gelombang dan *Spectrum* Motor Tiga Fasa Sebelum Penggunaan VFD

Menentukan Nilai Penalaan Pada Orde Tertinggi

Berdasarkan Standar IEEE 1531-2003, pemilihan frekuensi filter harmonisa ditentukan 3%-15% di bawah frekuensi yang ditentukan. Penurunan nilai dari orde ini dilakukan sebagai toleransi komponen filter untuk mencegah resonansi yang terjadi dalam sistem pada frekuensi yang mengganggu. Pada penelitian ini digunakan angka 10% sebagai frekuensi penyetelan. Orde yang memiliki nilai harmonisa tertinggi adalah 11 yang bekerja pada frekuensi 550Hz. Nilai penalaannya (h) adalah senilai (11 - (10% x 11)). Jika dikalkulasikan nilai (h) pada orde 11 = 9.9.

Menentukan Nilai Induktor Berdasarkan Orde Penyetelan

Penentuan nilai induktansi dihitung dengan persamaan (10), (11):

Orde 11:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \tag{10}$$

$$X_L = \frac{26.15 \Omega}{9.9^2}$$

$$X_L = \frac{26.15 \Omega}{98.01} = 0.266 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \tag{11}$$

$$L = \frac{0.266}{2\pi \times 50\text{Hz}}$$

$$L = \frac{0.266}{314} = 0.000847\text{H} = 0.847\text{mH}$$

Hasil perhitungan kemudian disajikan dalam bentuk Tabel 7.

Tabel 7. Spesifikasi Komponen Filter

| Spesifikasi | Nilai |
|--|----------|
| Kapasitor (C) | 121.78πF |
| Reaktansi Kapasitif (X _c) | 26.15 Ω |
| Reaktansi Induktif (X _L) orde 11 | 0.26 Ω |
| Induktansi (L) orde 11 | 0.847mH |
| Faktor daya awal (pf awal) | 0.85 |
| Faktor daya yang diinginkan (pf akhir) | 0.95 |
| Kapasitas Kapasitor Q _c | 5,520VAr |

Analisis Total Harmonic Distortion (THD)

Sebelum penggunaan VFD diketahui nilai THD_v motor induksi tiga fasa 5,01% dengan harmonisa tertinggi terjadi pada orde 11 dan 13. Setelah penggunaan VFD nilai THD_v dapat diredam dengan baik menjadi 3.54% Nilai ini mencukupi Standar IEEE 519-1992 yaitu 5 %. Tabel 8 menyajikan perbandingan produksi harmonisa motor induksi tiga fasa sebelum dan setelah penggunaan VFD.

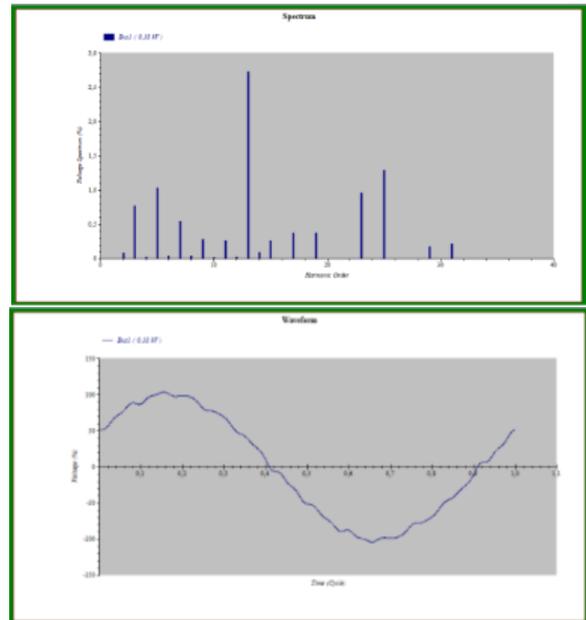
Tabel 8. Harmonisa Motor Tiga Fasa Sebelum Penggunaan VFD

| Sebelum Penggunaan VFD | | | |
|------------------------|-----------------------|------|------|
| Harmonisa Orde 11 (%) | Harmonisa Orde 13 (%) | THD | Pf |
| 3.35 | 2.95 | 5.01 | 0.85 |

Tabel 9. Harmonisa Motor Tiga Fasa Setelah Penggunaan VFD

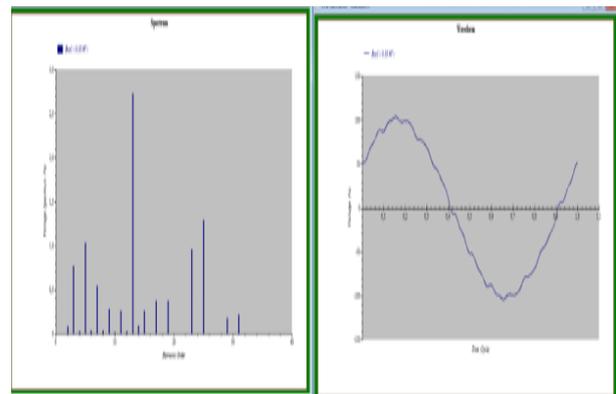
| Setelah Penggunaan VFD | | | |
|------------------------|-----------------------|------|------|
| Harmonisa Orde 11 (%) | Harmonisa Orde 13 (%) | THD | Pf |
| 0.25 | 2.95 | 3.66 | 0.95 |

Gambar 13 adalah tampilan *spectrum* dan gelombang yang terbentuk setelah penggunaan VFD.



Gambar 13. Gelombang dan *Spectrum* Motor 3 Fasa Seyelah Penggunaan VFD

Terlihat dari hasil pengukuran harmonisa bahwa VFD mampu meredam harmonisa pada orde tertinggi sehingga gelombang AC yang dihasilkan mendekati sempurna. Hal ini dipengaruhi oleh komponen kapasitif yang bekerja sebagai penyumbang daya reaktif dan memperbaiki faktor daya motor sehingga menghasilkan spektrum gelombang AC yang mendekati sempurna.



Gambar 14. Perbandingan Gelombang dan *Spectrum* Motor 3 Fasa Sebelum dan Setelah Penggunaan VFD

Dari dua gambar dapat dibandingkan gelombang dan spectrum sebelum dan setelah penggunaan VFD, yang mana VFD mampu meredam harmonisa pada orde tertinggi.

KESIMPULAN

Penggunaan VFD sebagai metode *starting* motor induksi tiga fasa mampu mengurangi lonjakan arus dan daya *output* motor bahkan jika motor diberikan kondisi beban mekanikal, performa VFD tidak berubah dan tidak mempengaruhi peningkatan frekuensi secara berkala. VFD yang dilengkapi komponen filter juga mampu mengurangi harmonisa yang terjadi pada motor induksi dan menunjukkan faktor daya yang mendekati 1. Hal ini dipengaruhi karena frekuensi tegangan suplai yang diterima motor diatur meningkat secara berkala lalu kemudian stabil pada frekuensi yang ditentukan. Ini juga disebabkan oleh kemampuan kapasitif VFD yang berperan sebagai penyuplai daya reaktif motor induksi tiga fasa.

Penelitian ini bisa dikembangkan dengan topologi yang berbeda yaitu *Voltage Source Inverter* dan *Current Source Inverter* untuk pembangkitan setengah gelombang dan gelombang penuh dengan hanya menggunakan dua komponen *Gate Drive*. Penggunaan metode ini juga bisa diaplikasikan tidak hanya pada *starting* motor namun bisa dikembangkan menjadi inverter pengatur kecepatan dengan gelombang *output* sinusoidal murni yang bisa diaplikasikan perusahaan manufaktur industri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengungkapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak terutama untuk orang tua dan orang terdekat lainnya yang telah berkontribusi terhadap penelitian, mulai dari bimbingan, saran, dan kritik sehingga penyusunan penelitian dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] M. A. Esmael Salama and W. M. Abdel-Karim, "Improving the starting torque and overall efficiency of split single phase induction motor", *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* Vol. 13, No. 4, Agustus 2023, pp. 3829~3837.
- [2] T. Y. Peristiaferi, R. Effendie, and J. Pramudijanto "Pengaturan Kecepatan Motor 3 Fasa pada Mesin Sentrifugal Menggunakan Metode PID Fuzzy", Vol. 4, No. 1, 2021.
- [3] D. Suharso, H. Purnomo, S. Winardi, and A. Budijanto, "Desain Human Machine Interface Android Dengan Teknologi Internet Of Things untuk Kontrol Star Delta Motor 3 Phase", *Jurnal Teknik Elektro UNIBA*, Vol. 7, No. 1, Oktober 2022.
- [4] P. Hagen Nielsen, and L. Petersen "Power Oscillation and Voltage Control Properties", *20th Wind Integration Workshop*, 2023.
- [5] R. M. Verghis1, C. McDowell, B. Blackwood, B. Lee, Daniel F. McAuley, and M. Clarke, "Re-analysis of ventilator-free days (VFD) in acute respiratory distress syndrome (ARDS) studies", *Verghis et al. Trials* Vol 24:183,2023.
- [6] S. B. N. H. Hemal, G. K. D. Dilshan, M. A. D. D. S. Karunaratne, K. N. Morawakaarachchi, S. V. Senanayake, R. H. M. D. Pramasiri, P. L. A. K. Piyumal, and A. L. A. K. Ranaweera "Comparison of different methods for generating SPWM signal for the development of a pure Sine wave inverter", *International Conference on Applied and Pure Sciences, Faculty of Science, University of Kelaniya, Sri Lanka*, 2023.
- [7] Sun, K.; Niu, W, "SPWM Inverter Control for Wireless Constant Current and Voltage Charging", *World Electr. Veh. J.* 2023, China.
- [8] M. H. Khan, M. R. Uddin, Z. Tasneem and K. M Salim "Power Factor Analysis of an Energy Efficient Single Phase VFD for Industrial Sewing Machines", *Department of Electrical & Electronic Engineering Independent University, Bangladesh, September 2019*.
- [9] S. Muttaqin, I. Setiawan, and M. Facta "Desain Dan Implementasi Voltage Source Inverter (VSI) Tiga Fase Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) Dengan DSPIC30F4011", *Jurnal Transmisi*, 18, (4), OKTOBER 2019.
- [10] A. Musa, B. M. Mohammed "An Experimental Study on Performance Determination of Slip-Ring Induction Motor", *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)* January 2023, Volume 10, Issue 1. Hal a411-a417.
- [11] M. Rochibi, S. Supratno, and M. Ilyas Sikki "Analisa Perancangan Filter Pasif Untuk Meredam Harmonisa Dan Perbaikan Faktor Daya Pada Beban Area Welding", *Seminar Nasional Teknik Elektro*, Oktober 2018, Malang. Hal120 – 126.
- [12] C. P. Hadisusila "Aplikasi Arduino dalam Teknik I/O untuk Mengintegrasikan dan Mengendalikan Perangkat Elektronik", *Jurnal Nusantara Of Engineering* Vol 6, No 2 Oktober 2023.
- [13] M.A.Donolo, "Slip-Dependent Motor Model", *PUB No; US 2018 0013375A1 Schweitzer Engineering Laboratories, Pullman (US) 2018*.

- [14] W.Wang, Y.Liu, Y.Chen, and C.Liu, "Optimization-Based Duty Cycle Allocation for A Five-Leg Inverter to Drive Two Electric Motors", *IEEE Transactions on Power Electronics* · September 2023. Hal. 11327 – 11337.
- [15] Baharudin, S. Jie , and Mustamin "Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Karakteristik (Unjuk Kerja) Motor Induksi Tiga Fasa", Jurnal Fokus Elektroda : Energi Listrik, Telekomunikasi, Komputer, Elektronika dan Kendali Volume 02 No 03, Tahun 2017. Hal 1-5.
- [16] H. Naldi, E. Zondra, and H. Yuwendius, "Studi Pengaruh Pemasangan Soft Stater Motor Induksi Tiga Fasa Pada Tisu Machine di PT. Pindo Deli Perawang", *Jurnal Teknik* 15(2):104-112. Oktober 2021.