

Perancangan Kontroler DC Link Inverter Sisi Jala-jala pada Kondisi Faktor Daya 1 untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu 100kW

Anwar Muqorobin
P2 Tenaga Listrik dan Mekatronika-LIPI
am200142001@yahoo.com

Estiko Rijanto
P2 Tenaga Listrik dan Mekatronika-LIPI
estiko@hotmail.com

Abstract

A control system for wind electrical power plant with the capacity of 100kW which is under development at the research center for electrical power and mechatronics Indonesian Institute of Sciences incorporates a 3 phases inverter attached to the grid. During operation this inverter delivers electrical power from DC link to the grid, while during start up it delivers electrical power from the grid to the DC link. This inverter needs to be controlled in order that its DC link voltage is kept constant in a certain range. This paper is aimed to design DC link voltage controllers for the grid side inverter. The controllers consist of feedback control and feed forward control signal from generator side current. This paper uses carrier based Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) and SPWM with zero sequence signal (ZSS). From simulation result it is concluded: (a) the designed DC link voltage controller can achieve the desired reference voltage, (b) SPWM with ZSS gives better DC voltage response than SPWM without ZSS, and (c) SPWM with ZSS gives power factor that is closer to 1 than SPWM without ZSS.

Keywords: wind electrical power plant, 3 phase inverter, DC link voltage controller, feedback control, feed forward control, sinusoidal PWM, ZSS.

Abstrak

Sistem kontrol pembangkit listrik tenaga bayu (PLTBayu) 100kW yang sedang dirancang bangun di Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik (Puslit Telimek) LIPI memakai inverter 3 fasa yang dipasang pada sisi jala-jala. Inverter ini berfungsi menyalurkan daya listrik yang dibangkitkan oleh generator induksi 3 fasa dari DC link saat operasi dan menyalurkan daya listrik dari jala-jala ke DC link saat start up. Saat melakukan fungsinya inverter ini perlu dikontrol untuk menjaga tegangan DC link pada kisaran nilai yang diinginkan. Makalah ini bertujuan untuk merancang kontroler tegangan DC link untuk inverter sisi jala-jala. Kontrol dc link terdiri dari kontrol umpan balik PI dan kontrol umpan maju dari arus yang masuk dari sisi generator. Pada makalah ini digunakan sinusoidal Pulse Width Modulation (PWM) dengan dan tanpa penambahan sinyal urutan nol (ZSS). Dari hasil simulasi ditarik kesimpulan: (a) kontroler DC link yang telah dirancang mampu mencapai tegangan referensi yang diinginkan, (b) modulasi dengan tambahan sinyal urutan nol memberikan tanggapan tegangan DC link yang lebih baik dari pada modulasi tanpa tambahan sinyal urutan nol, dan (c) modulasi dengan tambahan sinyal urutan nol memberikan faktor daya yang lebih mendekati 1 dari pada modulasi tanpa tambahan sinyal urutan nol.

Kata kunci: tenaga bayu, pembangkit listrik, inverter 3 fasa, kontrol tegangan dc link, kontrol umpan balik, kontrol umpan maju, sinusoidal PWM, ZSS.

1. Pendahuluan

Isu semakin berkurangnya persediaan bahan bakar minyak dan batubara dan efek negatifnya bagi lingkungan, mendorong penelitian sumber energi yang lebih murah dan ramah lingkungan, yang dikenal dengan energi terbarukan. Salah satu jenis energi yang ramah lingkungan adalah energi angin. Agar lebih mudah untuk dimanfaatkan, energi angin tersebut perlu diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan generator. Generator yang paling banyak digunakan adalah generator induksi tipe sangkar tupai. Energi listrik yang dihasilkan perlu dihubungkan dengan jaringan listrik yang ada agar dapat dimanfaatkan dengan lebih luas. Listrik yang diproduksi hanya dapat disambung ke jala-jala jika memenuhi standar mutu yang ditetapkan, salah satunya standar mutu tegangan dan frekuensi yang ditetapkan dalam keputusan menteri [1]. Proses penyaluran energi listrik ke jaringan listrik mengalami kendala karena sifat energi angin yang selalu berubah-ubah (kecepatan angin tidak tetap). Untuk itu diperlukan antarmuka yang dikenal dengan konverter daya.

Konverter daya yang digunakan adalah konverter tipe *back to back* (B2B) [2], yang terdiri dari konverter sisi generator dan inverter sisi jala-jala. Inverter sisi jala-jala berfungsi menyalurkan daya listrik yang dibangkitkan oleh generator induksi 3 fasa dari DC link saat operasi dan menyalurkan daya listrik dari jala-jala ke DC link saat start up. Saat melakukan fungsinya inverter ini perlu dikontrol untuk menjaga tegangan DC link pada kisaran nilai yang diinginkan. Model dinamika konverter yang mengkonversi tegangan AC dari jala-jala ke tegangan DC dapat dilihat pada [3], sedangkan makalah ini membuat model dinamika inverter yang mengkonversi tegangan DC menjadi tegangan AC. Kontrol konverter daya untuk pembangkit listrik tenaga bayu skala 11kW telah dikerjakan pada [4], namun makalah tersebut meletakkan penekanan pada kontrol otomatis perubahan mode interkoneksi dan

stand alone. Sedangkan hasil kajian berbagai metoda modulasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation*, PWM) dilaporkan oleh M.Knapczyk [5].

Makalah ini bertujuan untuk merancang kontroler tegangan DC link untuk inverter sisi jala-jala. Sinyal kontrol yang dihasilkan diubah dalam bentuk modulasi lebar pulsa dengan modulasi sinusoidal. Terdapat dua jenis modulasi sinusoidal yang digunakan, yaitu dengan dan tanpa tambahan sinyal urutan nol. Dalam tulisan ini, dibandingkan tanggapan kedua jenis modulasi tersebut.

2. Deskripsi sistem

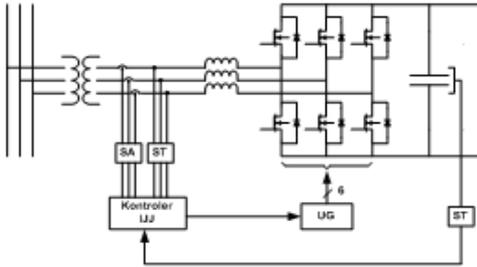
Gambar 1 menunjukkan diagram sistem kontrol tegangan DC link pada inverter 3 fasa sisi jala-jala yang dirancang pada makalah ini. Sistem ini secara garis besar tersusun oleh elemen-elemen utama sebagai berikut:

- a. Jembatan IGBT 3 fasa.
- b. Jalur yang menghubungkan tegangan IGBT dengan jala-jala.
- c. Lilitan induktansi dan elemen resistansi.
- d. Transformer penghubung daya inverter dan daya jala-jala.
- e. Kapasitor sebagai penyusun DC link.
- f. Sensor tegangan yang mengukur tegangan jala-jala (ST).
- g. Sensor arus yang mengukur arus listrik yang mengalir antara jembatan IGBT dan jala-jala (SA).
- h. Sensor tegangan DC link yang mengukur tegangan DC (ST DC).
- i. Kontroler inverter jala-jala (IJJ).
- j. Unit gerbang yang menguatkan daya PWM dari kontroler agar mampu membuka gerbang IGBT (UG).

Dengan memakai notasi (e_a, e_b, e_c) sebagai tegangan fasa jala-jala, (i_a, i_b, i_c) sebagai arus yang mengalir dari inverter ke jala-jala, dan (v_a, v_b, v_c) sebagai tegangan fasa pada kaki-kaki inverter, maka pada inverter sisi jala-jala berlaku persamaan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_{dc} i_{dc} \quad (2)$$



Gambar 1 Sistem control inverter jala-jala

Dimana: v_{dc} adalah tegangan kapasitor DC link dan i_{dc} adalah arus listrik yang mengalir keluar dari DC link menuju jembatan IGBT.

Persamaan (1) berarti tegangan fasa pada kaki inverter sama dengan tegangan fasa jala-jala ditambah dengan tegangan pada induktor yang dilambangkan dengan tahanan R dan induktansi L . Persamaan (2) berarti daya listrik yang mengalir ke luar kapasitor DC link C sama dengan jumlah daya listrik yang mengalir melewati jembatan IGBT. Muatan listrik yang tertimbun di kapasitor DC link adalah jumlah netto arus listrik yang mengalir masuk ke kapasitor diintegrasikan terhadap waktu sehingga didapat persamaan di bawah ini.

$$v_{dc} = \frac{1}{C} \int (i_k - i_{dc}) dt \quad (3)$$

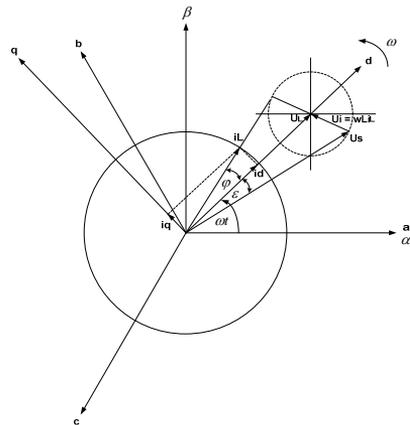
Dengan i_k adalah arus listrik yang mengalir masuk ke kapasitor DC link dari arah generator turbin angin.

Tegangan fasa dan arus fasa pada jala-jala dapat diekspresikan sebagai berikut.

$$\left. \begin{aligned} e_a &= E_m \cos(\omega t) \\ e_b &= E_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ e_c &= E_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} i_a &= I_m \cos(\omega t + \varphi) \\ i_b &= I_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi) \\ i_c &= I_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Dengan E_m adalah amplitudo tegangan fasa, ω adalah frekuensi sudut, I_m adalah amplitudo arus fasa, φ adalah selisih sudut antara arus listrik dengan tegangan listrik, dan t menunjukkan waktu. Persamaan di atas adalah persamaan pada koordinat stasioner spasial A-B-C. Untuk memudahkan analisis dilakukan transformasi koordinat dari koordinat A-B-C ke koordinat stasioner $\alpha - \beta$. Sumbu α dipilih berimpit dengan sumbu A sedangkan sumbu β mendahului sumbu α sebesar 90° seperti ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2 Transformasi koordinat

Berbasis transformasi koordinat pada gambar 2, maka diperoleh transformasi vektor variabel $x_{abc} = [x_a \ x_b \ x_c]^T$ pada koordinat A-B-C ke $x_{\alpha\beta 0} = [x_\alpha \ x_\beta \ x_0]^T$ pada koordinat $\alpha - \beta$ dan sebaliknya sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Pada sistem tenaga listrik umumnya tanpa kabel netral yang berarti berlaku asumsi sebagai berikut.

$$x_0 = \sqrt{\frac{1}{3}}(x_a + x_b + x_c) = 0 \quad (8)$$

Lebih lanjut dipilih sebuah koordinat rotasi sinkron $d-q$ yang berotasi dengan kecepatan sama dengan frekuensi sudut tegangan listrik ω . Maka diperoleh transformasi dari koordinat stasioner $\alpha-\beta$ ke koordinat rotasi sinkron $d-q$ dan sebaliknya sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Dari hasil di atas diperoleh hubungan sebagai berikut.

$$\left. \begin{aligned} x_{dq0} &= T_k x_{abc} \\ x_{abc} &= T_k^{-1} x_{dq0} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Dimana T_k melambangkan matriks transformasi koordinat dari koordinat A-B-C ke koordinat $d-q$, dan T_k^{-1} melambangkan matriks transformasi koordinat arah sebaliknya.

Dari (1) didapat persamaan diferensial yang mengekspresikan dinamika arus listrik yang mengalir dari DC link ke jala-jala sebagai berikut.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_d - e_d \\ v_q - e_q \end{bmatrix} \quad (12)$$

Persamaan daya listrik (2) dan persamaan tegangan DC link (3) berubah menjadi persamaan di bawah ini.

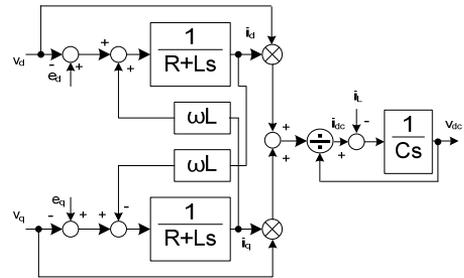
$$v_d i_d + v_q i_q = v_{dc} i_{dc} \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} v_{dc} = \frac{i_k}{C} - \frac{1}{C v_{dc}} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (14)$$

Dari (12) dan (14), diperoleh model dinamika inverter sisi jala-jala seperti diekspresikan dalam bentuk diagram kotak pada gambar 3.

Dari hasil ini diperoleh beberapa informasi sbb:

- Terdapat efek kopling yaitu: dinamika arus pada sumbu d mendapat pengaruh arus sumbu q , dan sebaliknya dinamika arus pada sumbu q mendapat pengaruh arus sumbu d .
- Arus yang mengalir pada sumbu d dapat dikontrol oleh tegangan inverter sumbu d , dan arus yang mengalir pada sumbu q dapat dikontrol oleh tegangan sumbu q .
- Tegangan kapasitor DC link dapat dikontrol oleh daya pada sumbu d dan daya pada sumbu q .



Gambar 3 Model dinamika inverter jala-jala

3. Perancangan controller

Tegangan DC link dapat dikontrol oleh daya listrik yang mengalir dari generator turbin angin ke jala-jala pada sumbu d dan q . Daya listrik ini ditentukan oleh tegangan inverter dan arus yang mengalir di inverter. Nilai arus yang mengalir di inverter ditentukan oleh karakteristik dinamika arus dan oleh sinyal-sinyal yang mempengaruhinya (dalam hal ini: tegangan

jala-jala, tegangan inveter dan efek kopling). Oleh karena itu diperlukan kontroler arus yang berperan memperbaiki karakteristik dinamika arus listrik di inverter.

Pada makalah ini kontroler arus listrik dirancang menggunakan pendekatan kontrol arah vektor tegangan (VOC: voltage vector oriented control). Pada pendekatan ini koordinat rotasi sinkron $d-q$ dipilih sedemikian rupa sehingga sumbu d berimpitan dengan vektor tegangan jala-jala e_g . Dalam notasi vektor hal ini berarti $e_g = e_d + je_q = e_d$. Hal ini berarti tegangan pada sumbu q bernilai nol. Pada pendekatan ini koordinat rotasi sinkron $d-q$ berotasi dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan tegangan jala-jala yaitu ω . Sudut rotasi sumbu d dilihat dari sumbu stasioner A (sumbu tegangan fasa a) sebesar θ perlu dihitung agar dapat melakukan transformasi koordinat dari sumbu A-B-C ke sumbu $d-q$. Kontroler arus dirancang berdasarkan model dinamika arus listrik pada koordinat $d-q$. Untuk menyalakan IGBT dengan tegangan inverter pada sumbu A-B-C, sinyal keluaran kontroler arus tersebut dikonversi balik menggunakan transformasi koordinat dari sumbu $d-q$ ke sumbu A-B-C.

Tegangan inverter dapat digunakan sebagai sinyal kontrol menurut aturan kontrol berikut ini.

$$\left. \begin{aligned} v_d &= \Delta v_d - \omega Li_q + e_d \\ v_q &= \Delta v_q + \omega Li_d + e_q \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Elemen pertama pada ruas kanan aturan kontrol tersebut merupakan sinyal kontrol umpan balik, elemen kedua merupakan sinyal kontrol de-kopling, dan elemen ke-3 merupakan sinyal kontrol umpan maju. Dengan mensubstitusikan aturan kontrol pada (15) ke persamaan dinamika arus listrik pada (12) diperoleh persamaan dinamika

arus listrik baru yang diperbaiki karakteristiknya.

Pada makalah ini kontroler umpan balik arus listrik dipilih sebagai berikut.

$$\left. \begin{aligned} \Delta v_d &= k_p \left[\varepsilon_d + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon_d dt \right] \\ \Delta v_q &= k_p \left[\varepsilon_q + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon_q dt \right] \\ \varepsilon_d &= i_d^* - i_d \\ \varepsilon_q &= i_q^* - i_q \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

dimana: i_d^* adalah nilai arus referensi pada sumbu d , i_q^* adalah nilai arus referensi pada sumbu q , k_p adalah nilai gain proporsional, dan T_i adalah nilai waktu integral.

Daya aktif P dan daya reaktif Q yang mengalir ke jala-jala dari DC link dihitung sebagai berikut.

$$\left. \begin{aligned} P &= \text{Re} \{ e_g^* i_g \} \\ &= e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \\ &= v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \\ &= e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta = e_d i_d + e_q i_q \\ &= v_{dc} i_{dc} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} Q &= \text{Im} \{ e_g^* i_g \} \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} (e_{ab} i_c + e_{bc} i_a + e_{ca} i_b) \\ &= e_\beta i_\alpha - e_\alpha i_\beta = e_q i_d - e_d i_q \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Kondisi faktor daya 1 yang ingin dicapai pada makalah ini berarti

$$PF = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = 1 \quad (20)$$

Hal ini berarti arus listrik perlu diatur agar nilai daya reaktif Q sama dengan nol. Salah satu caranya adalah menempatkan vektor arus jala-jala $i_g = i_d + ji_q$ berimpitan dengan vektor tegangan jala-jala, atau dengan kata lain mengatur agar selisih

sudut fasa arus dan sudut fasa tegangan sama dengan nol ($\varphi = 0$). Tujuan ini direalisasikan dengan menetapkan $i_a^* = 0$.

Dengan mengaplikasikan aturan kontrol arus di atas maka diperoleh persamaan dinamika arus listrik lup tertutup yang baru sebagai berikut.

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{1}{L}(R + K_a)i_d + K_a i_d^* \quad (21)$$

dimana K_a melambangkan pengaruh kontrol arus umpan balik. Konsekuensi bekerjanya kontroler arus pada tegangan DC link adalah merubah dinamikanya menjadi sebagai berikut.

$$\frac{d}{dt} v_{dc} = \frac{1}{C} \left(i_k - \frac{1}{v_{dc}} v_d i_d \right) \quad (22)$$

Dari persamaan dinamika tegangan DC link tersebut diketahui bahwa pada keadaan keseimbangan daya listrik $v_{dc} = [v_{dc}]_o$ adalah konstan. Sehingga arus listrik yang mengalir dari generator turbin angin i_k (yang nilainya berubah-ubah tergantung energi kinetik angin yang dikonversi oleh turbin angin) harus dialirkan ke jala-jala dengan mengontrol nilai i_d . Pada keadaan keseimbangan berlaku hubungan

$$i_d = \frac{[v_{dc}]_o}{[v_d]_o} i_k \quad (23)$$

Hasil linierisasi pada titik operasi (tegangan DC link, tegangan jala-jala) dan titik keseimbangan i_d dan i_k adalah

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta v_{dc} &= \frac{1}{C \{ [v_{dc}]_o + \Delta v_{dc} \}} \{ [v_d]_o + \Delta v_d \} \\ &\quad \{ [i_d]_o + \Delta i_d \} - \frac{i_k}{C} \\ &= \frac{[v_d]_o}{C [v_{dc}]_o} \{ [i_d]_o + \Delta i_d \} - \frac{i_k}{C} \end{aligned}$$

Oleh karena itu pada makalah ini diusulkan aturan kontrol tegangan DC link sebagai berikut.

$$i_d^* = \frac{[v_d]_o}{[v_{dc}]_o} i_k + i_d^v \quad (24)$$

Elemen pertama pada ruas sebelah kanan adalah elemen kontrol umpan maju dan elemen ke-2 adalah elemen kontrol umpan balik. Elemen kontrol umpan balik pada makalah ini diberikan oleh

$$i_d^v = k_p^v \left[\mathcal{E}_v + \frac{1}{T_i^v} \int \mathcal{E}_v dt \right] \quad (25)$$

$$\mathcal{E}_v = v_{dc} - v_{dc}^* \quad (26)$$

Dari (22) diketahui bahwa pada saat tegangan DC link nol atau sangat kecil dan saat kontroler arus baru mulai bekerja dimana arus dari generator turbin angin masih nol atau kecil, maka dinamika tegangan DC link ditentukan oleh arus yang mengalir dari arah jala-jala. Agar tidak terjadi lonjakan tegangan DC yang besar maka tegangan DC link senantiasa diset agar sistem kontrol mulai bekerja saat tegangan DC link memiliki nilai yang cukup besar mendekati nilai operasinya.

Tabel 1. Parameter inverter jala-jala.

| | |
|-------------------------------|--------------------------|
| Tegangan jala-jala | 480 V (RMS) |
| Frekuensi jala-jala | 50 Hz |
| Induktansi | 2,5 mH |
| Kapasitor DC link | 4,5 mF |
| Daya dari konverter generator | 60 + 40 $\sin(\pi t)$ KW |
| Vdc | 800V |

Tabel 1 menunjukkan nilai parameter inverter jala-jala yang digunakan untuk perancangan kontroler DC link pada makalah ini. Nilai parameter dihitung menggunakan rumusan pada [6].

4. Perancangan Modulator

Tegangan fasa inverter pada (1) dan (2) dan arus fasa pada (3) masih dalam bentuk sinusoidal analog. Pada kenyataannya tegangan ini direalisasikan menggunakan pensaklaran IGBT pada jembatan inverter. Oleh karena itu tegangan fasa inverter dan arus fasa inverter tersebut perlu dimodulasi ke bentuk on-off. Perlu diingat bahwa pada

inverter ini titik nol tegangan jala-jala 3 fasa tidak tersambung ke netral kapasitor DC link. Jika diekspresikan menggunakan status on-off IGBT maka persamaan (1), (2), dan (3) berubah menjadi sbb.

$$\begin{bmatrix} u_{Sa} \\ u_{Sb} \\ u_{Sc} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$u_{Sa}i_a + u_{Sb}i_b + u_{Sc}i_c = v_{dc}i_{dc} \quad (28)$$

$$v_{dc} = \frac{1}{C} \int (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{dc}) dt \quad (29)$$

S_a, S_b, S_c melambangkan status [1,0] dari saklar pada masing-masing kaki inverter. Dengan memperhatikan tegangan titik netral $v_N = \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c)v_{dc}$ maka diperoleh tegangan modulasi fasa A sebagai berikut.

$$u_{Sa} = f_a v_{dc} = S_a v_{dc} - v_N \quad (30)$$

Oleh karena itu tegangan fasa pada masing-masing kaki inverter diberikan oleh persamaan berikut.

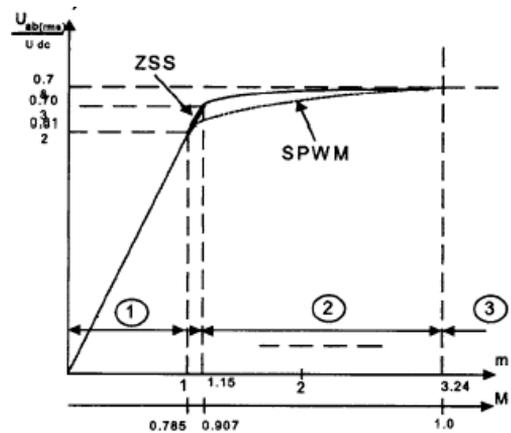
$$\left. \begin{aligned} u_{Sa} &= f_a v_{dc} = \left\{ \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3} \right\} v_{dc} \\ u_{Sb} &= f_b v_{dc} = \left\{ \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \right\} v_{dc} \\ u_{Sc} &= f_c v_{dc} = \left\{ \frac{2S_c - (S_a + S_b)}{3} \right\} v_{dc} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Sedangkan tegangan antar fasa pada kaki inverter adalah.

$$\left. \begin{aligned} u_{Sab} &= (S_a - S_b)v_{dc} \\ u_{Sbc} &= (S_b - S_c)v_{dc} \\ u_{Sca} &= (S_c - S_a)v_{dc} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Pada makalah ini pensaklaran dilakukan menggunakan modulasi lebar pulsa (Pulse Width Modulation, PWM). Tujuan PWM adalah untuk: (1) mengontrol amplitudo dari harmonisa utama tegangan inverter 3 fasa, (2) membentuk harmonisa utama arus fasa yang sedekat mungkin berbentuk sinusoidal. Pada umumnya spesifikasi teknis modulasi meliputi: (a) rentang operasi linear yang lebar, (b) frekuensi pensaklaran yang tetap, (c) harmonisa frekuensi tinggi pada arus fasa yang kecil, dan (d) memaksimalkan pemakaian tegangan DC link. Modulasi index m adalah bilangan yang

mengekspresikan penggunaan tegangan DC link pada proses pembuatan tegangan PWM.



Gambar 4. Karakteristik PWM

Gambar 4 menunjukkan ketergantungan nilai tegangan antar kaki inverter u_{Sab} terhadap nilai index modulasi m dan nilai tegangan DC link v_{dc} [5]. Dapat dilihat adanya zona linier dan zona non-linier. Pada zona linier nilai $\frac{u_{Sab}}{v_{dc}}$ merupakan fungsi linier m , sedangkan pada zona non-linier nilai $\frac{u_{Sab}}{v_{dc}}$ merupakan fungsi non-linier m . Untuk mendapatkan arus fasa yang lebih sempurna, PWM perlu dilakukan pada zona linier. Namun untuk mendapatkan waktu tanggap yang lebih cepat, PWM perlu dioperasikan pada zona non-linier. Pengoperasian PWM pada zona non-linier menghasilkan distorsi arus fasa yang menurunkan mutu listrik.

Pada makalah ini digunakan Carrier-Based Sinusoidal PWM (CB-SPWM). Tegangan kaki inverter diperoleh dengan cara membandingkan tegangan fasa referensi inverter (v_a, v_b, v_c) dengan sinyal pembawa yang berbentuk segi tiga. Tegangan fasa referensi inverter (v_a, v_b, v_c) berbentuk sinusoidal dengan frekuensi listrik jala-jala. Amplitudo tegangan fasa referensi ini proporsional dengan amplitudo

harmonisa utama tegangan kaki inverter. Agar diperoleh tegangan modulasi antar fasa pada kaki inverter yang simetris antara sisi positif dan negatif, disarankan 2 hal yaitu: (a) frekuensi sinyal pembawa (sinyal segi tiga) sama dengan kelipatan ganjil dari 3 kali frekuensi tegangan referensi [3]. Pada CB-SPWM indeks modulasi didefinisikan sebagai perbandingan antara amplitudo tegangan fasa referensi terhadap amplitudo sinyal pembawa.

$$m = \frac{V_a}{V_p} = \frac{V_b}{V_p} = \frac{V_c}{V_p} \quad (33)$$

Tegangan referensi merupakan hasil transformasi balik ($d-q$ ke a-b-c) dari sinyal keluaran kontroler arus (v_d, v_q) pada (15). Nilai amplitudo tegangan referensi maksimal dibatasi oleh nilai indeks modulasi maksimal $m = 1$, yaitu:

$$V_{a_max} = U_{a_con} = \frac{v_{dc}}{2} \quad (34)$$

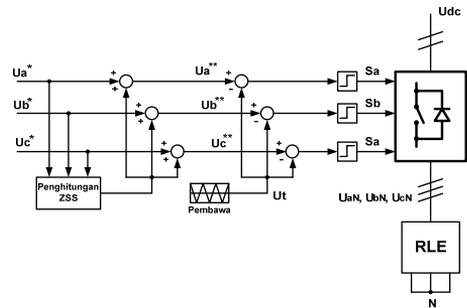
Kemudian diperoleh nilai RMS tegangan referensi PWM antar fasa

$$u_{Sab} = \sqrt{3} \frac{1}{\sqrt{2}} U_{a_con} = \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{2}} \right) v_{dc} \quad (35)$$

$$\therefore = 0,612 v_{dc}$$

Jika titik netral pada sisi jala-jala dari inverter (titik N) tidak tersambung dengan titik tengah sisi DC link (titik 0), arus fasa hanya tergantung dari beda tegangan antar fasa. Oleh karena itu dapat dimasukkan sinyal urutan nol (Zero Sequence Signal, ZSS) yang memiliki frekuensi 3 kali frekuensi tegangan fasa (frekuensi harmonisa ke-3) tanpa menimbulkan distorsi

tegangan fasa (v_a, v_b, v_c) dan tanpa mempengaruhi bentuk arus fasa. Gambar 5 menunjukkan diagram kotak skema modulator SPWM memakai ZSS.



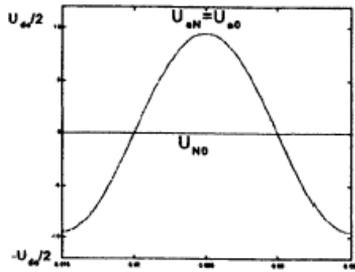
Gambar 5. SPWM dengan ZSS.

Sinyal ZSS muncul di antara titik netral N dan titik nol 0 sebagai tegangan v_{N0} dan nampak pada tegangan antara titik kaki inverter dengan titik nol (v_{a0}, v_{b0}, v_{c0}). Gambar 6 menunjukkan ilustrasi tegangan fasa pada kaki inverter tanpa memakai ZSS dan dengan ZSS. Jika amplitudo ZSS dipilih $\frac{1}{4}$ amplitudo sinyal pembawa maka diperoleh hasil yang meminimalkan harmonisa arus listrik, dan jika amplitudo ZSS dipilih $\frac{1}{6}$ amplitudo sinyal pembawa maka diperoleh hasil yang memaksimalkan zona linier menjadi $m = 1,15$. Hal ini akan meningkatkan penggunaan tegangan DC link dari 61,2% menjadi 70,3%.

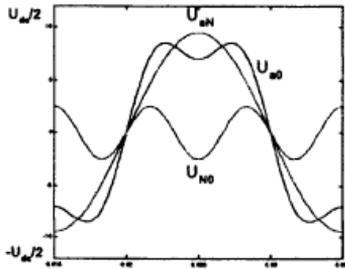
Pada makalah ini dirancang SPWM dengan ZSS yang memiliki frekuensi sinyal pembawa tiga kali dan amplitudo $\frac{1}{6}$. Hasil modulasi memakai ZSS dibandingkan kinerjanya dengan modulasi tanpa ZSS.

5. Hasil simulasi dan pembahasan

Untuk mengecek kinerja kontroler DC link inverter jala-jala yang dirancang pada makalah ini, telah dibuat program untuk simulasi komputer. Simulasi komputer dilakukan dengan tujuan untuk pengujian kinerja kontroler tegangan DC link saat daya listrik dari arah konverter generator berubah-ubah. Hal ini untuk mengecek apakah kontroler DC link inverter jala-jala mampu mengontrol aliran daya listrik ke jala-jala sesuai dengan daya listrik yang masuk dari arah generator dengan tetap menjaga nilai tegangan DC link tetap.



(a) SPWM murni.

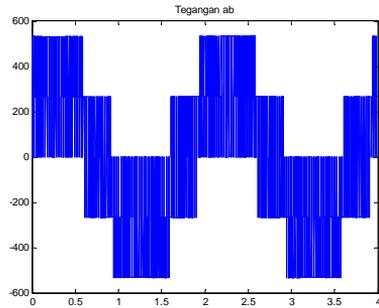


(b) SPWM dengan ZSS

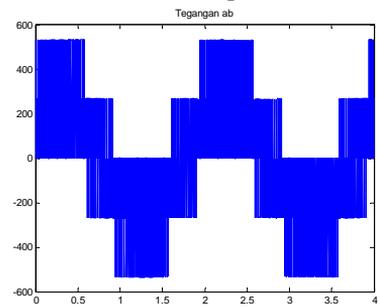
Gambar 6. Ilustrasi SPWM dengan ZSS.

Simulasi komputer dilakukan terhadap dua kasus yaitu: (a) modulator SPWM tanpa ZSS dan (b) modulator SPWM dengan ZSS. Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 7 sampai dengan gambar 15. Gambar (a) adalah simulasi sinusoidal PWM tanpa menggunakan ZSS dan gambar (b) dengan menggunakan ZSS. Gambar 7 sampai dengan 9 menunjukkan perbedaan kedua modulasi. Gambar 7 menunjukkan tegangan antara kaki inverter fasa A dan kaki inverter fasa B. Gambar 8 menunjukkan sinyal referensi PWM, sedangkan gambar 9 menunjukkan sinyal referensi PWM yang di-closed-up.

Gambar 10 dan 11 masing-masing menunjukkan aliran daya dan tegangan dc link. Garis hijau tipis menunjukkan nilai referensi sedangkan garis biru tebal menunjukkan nilai hasil simulasi. Kedua gambar ini menunjukkan bahwa kedua modulasi mampu mencapai sinyal referensi yang diinginkan, dan bahwa modulasi dengan ZSS memberikan tanggapan yang lebih baik.



(a) Tanpa ZSS

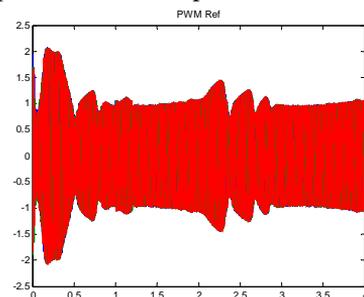


(b) Dengan ZSS

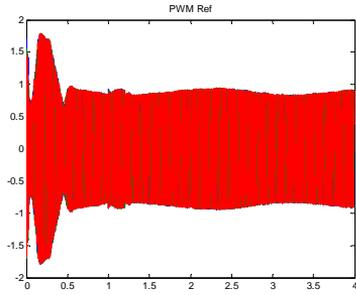
Gambar 7. Tegangan AB pada kaki inverter

Gambar 12 dan 13 menunjukkan tegangan dan arus sisi jala-jala. Garis biru tebal menunjukkan tegangan sedangkan garis hijau tipis menunjukkan arus. Terlihat keduanya menunjukkan faktor daya yang mendekati satu.

Gambar 14 dan 15 menunjukkan arus d dan q. Garis hijau tipis menunjukkan nilai referensi sedangkan garis biru tebal menunjukkan hasil simulasi. Terlihat bahwa arus q dengan menggunakan modulasi ZSS mempunyai kondisi transient yang lebih kecil di sekitar nol, dengan demikian menunjukkan faktor daya yang lebih baik dari pada modulasi tanpa ZSS.

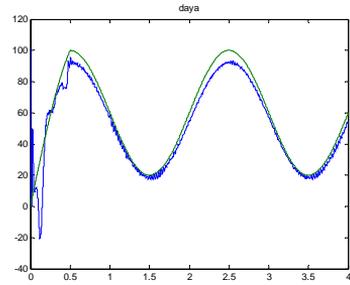


(a) Tanpa ZSS



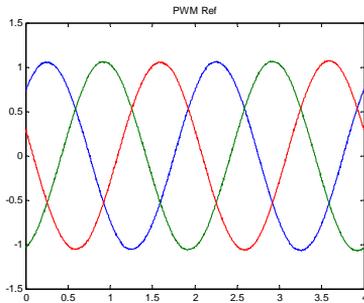
(b) Dengan ZSS

Gambar 8. Sinyal referensi PWM.

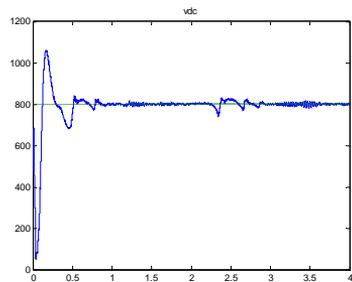


(b) Dengan ZSS

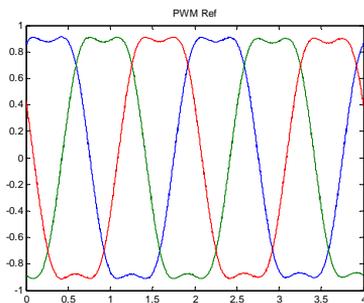
Gambar 10. Aliran daya listrik.



(a) Tanpa ZSS

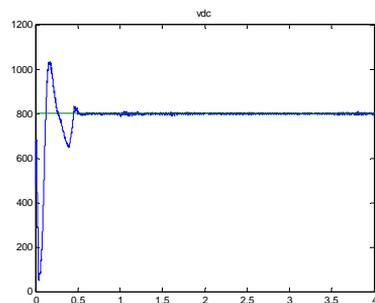


(a)Tanpa ZSS



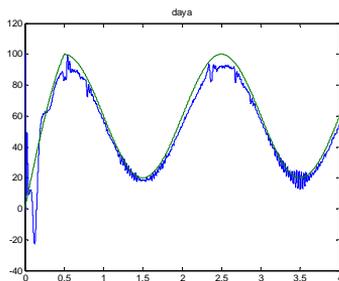
(b) Dengan ZSS

Gambar 9. Sinyal referensi PWM (close up).

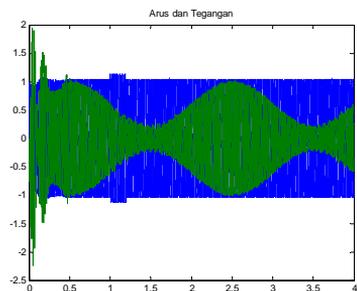


(b)Dengan ZSS

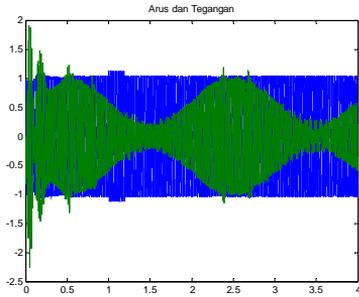
Gambar 11. Tegangan DC link.



(a) Tanpa ZSS

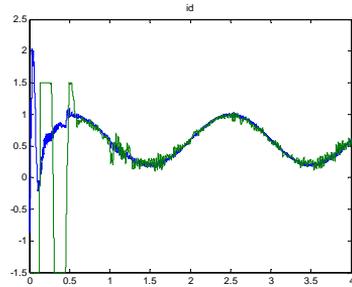


(a) Tanpa ZSS



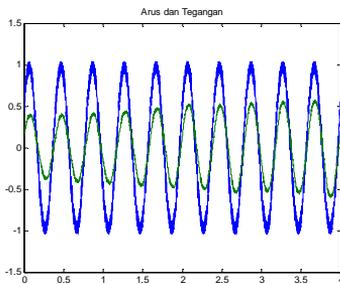
(b) Dengan ZSS

Gambar 12. Tegangan dan arus jala-jala.



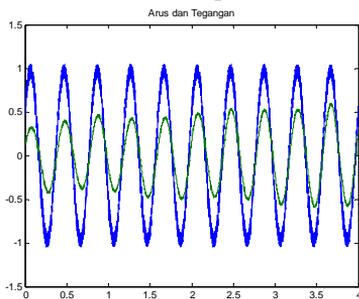
(b) Dengan ZSS

Gambar 14. Arus i_d .

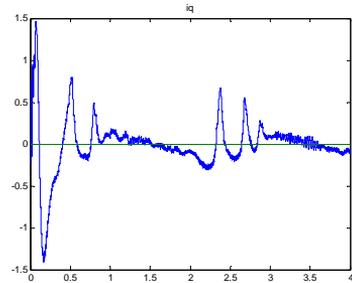


(a) Tanpa ZSS

Gambar 13. Tegangan dan arus jala-jala (close up).

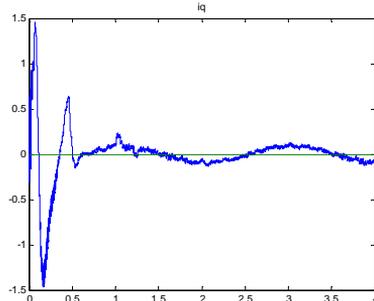


(b) Dengan ZSS

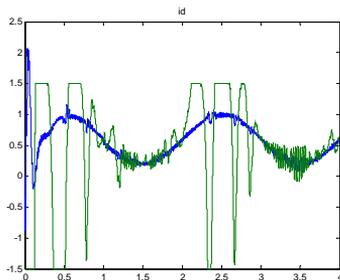


(a) Tanpa ZSS

Gambar 15. Arus i_q .



(b) Dengan ZSS



(a) Tanpa ZSS

6. Kesimpulan dan saran

Dari hasil simulasi dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Kontroler tegangan DC link yang dirancang mampu menghasilkan tanggapan yang dapat mencapai tegangan referensi yang diinginkan.
- Modulasi menggunakan ZSS menghasilkan tanggapan tegangan DC link yang lebih baik daripada modulasi tanpa menggunakan ZSS.

- c. Modulasi menggunakan ZSS menghasilkan faktor daya yang lebih mendekati 1 daripada modulasi tanpa menggunakan ZSS .

7. Daftar pustaka

- [1] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, *Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali, Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 3 Tahun 2007*, Jakarta, 29 Januari 2007.
- [2] F. Blaabjerg, Z. Chen, R. Teodorescu, F. Iov, *Power Electronics in Wind Turbine Systems*, <http://ecee.colorado.edu/~ecen2060/materials/references/wind/Blaabjerg04078034.pdf>, diakses 4 Februari 2009.
- [3] *Semiconductor Circuit for Power Converter*, Ohmsha, 1987.
- [4] R. Teodorescu dan F. Blaabjerg, "Flexible Control of Small Wind Turbines With Grid Failure Detection Operating in Stand-Alone and Grid-Connected Mode", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19, No. 5, September 2004.
- [5] M. Knapczyk dan K. Pienkowski, *Analysis of Pulse Width Modulation Techniques for AC/DC Line-side Converter*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały, Nr.26, 2006.
- [6] Mariusz, M., "Sensorless Control Strategies for Three Phase PWM Rectifiers", *PhD thesis Warsaw University of Technology*, Warsaw, 2001.
- [7] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, dan F. Blaabjerg, *Control in Power Electronics. Selected Problems*. New York: Academic, 2002.