

Simulasi Penggerak Roda Motor Sinkron Permanen Magnet Untuk Membuktikan Kesesuaian Super Kapasitor Dalam Kendaraan Listrik Hibrida (Hybrid Electric Vehicle – Hev) Menggunakan Plecs (Matlab/Simulink)

Sugeng Purwanto

Sekolah Tinggi Teknik PLN
sugeng.purwanto@sttpln.ac.id

ABSTRACT

In the framework of the development of a drive system used for propulsion in a hybrid electric vehicle (HEV), a 16-pole permanent magnet (PM) synchronous in wheel motor is used. HEV wheel motor system is designed to convert electrical power into mechanical torque on the wheel using AC voltage as a voltage source and supercapacitor as an energy storage, two level IGBT's voltage source converters, and permanent magnet synchronous motor (PMSM). The purpose of this research is to simulate the suitability of 3300 μF capacitors in HEV systems with PLECS based on MATLAB / SIMULINK. The design of current controller, speed controller and HEV electrical model are discussed as components of a drive control. All components used in this study use predetermined data and parameters. The voltage, current and angular velocity of HEV wheel motors output were recorded. The simulation results show that with a constant current, the speed will decrease and the capacitor voltage will increase. PMSM is changed as a generator that stores electric current to super capacitors, which can store more energy with a short time to be charged. In this case it can be concluded that super capacitors are very suitable to be used in this system.

Keywords: electric motor, battery, super capacitor, hybrid system, PLECS, hybrid engine, Dspace

ABSTRAK

Di dalam rangka pengembangan sistem penggerak kendaraan bermotor dengan sistem penggerak yang menggunakan motor sinkron dengan permenen magnet, 16 kutub, sebagai penggerak di dalam kendaraan listrik hibrida (hybrid electric vehicle – HEV). Sistem penggerak roda di dalam HEV dirancang untuk mengubah tenaga listrik menjadi tenaga mekanik sebagai sistem penggerak roda dengan menggunakan tegangan AC sebagai sumber tagangan dan super kapasitor sebagai sistem penyimpanan energi, konverter sumber tegangan insulated-gate bipolar transistor (IGBTs), dan motor sinkron permanen magnet (permanen magnet synchronounous motor – PMSM). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mensimulasikan kesesuaian kapasitor 3300 μF dalam sistem HEV dengan PLECS berdasarkan MATLAB / SIMULINK. Desain dari pengontrol arus, pengontrol kecepatan dan model HEV yang digunakan sebagai komponen dari kontrol penggerak. Semua komponen yang digunakan di dalam penelitian ini menggunakan data-data dan parameter-parameter yang telah ditentukan serta dilakukan pencatatan jumlah tegangan, arus, dan kecepatan sudut motor roda HEV yang di hasilkan. Hasil simulasi membuktikan bahwa dengan arus yang konstan, kecepatan menjadi menurun dan tegangan kapasitor akan meningkat. Sehingga PMSM berubah sebagai generator yang menyimpan arus listrik ke dalam super kapasitor, sehingga super kapasitor dapat menyimpan lebih banyak energi dengan waktu singkat untuk diisi (charged). Dalam hal ini dapat disimpulkan bahwa super kapasitor sangat sesuai digunakan pada sistem ini.

Kata kunci: motor listrik, baterai, super kapasitor, sistem hibrid, PLECS, mesin hibrid, Dspace.

1. PENDAHULUAN

Selama beberapa dekade terakhir, dunia otomotif makin berkembang. Perhatian dunia tertuju kepada pengembangan kendaraan listrik (*electric vehicles - EV*) dan kendaraan listrik hibrida (*hybrid electric vehicles – HEVs*). Pada pertengahan abad ke-19 telah dikembangkan kendaraan listrik pertama ketika listrik digunakan sebagai tenaga penggerak pada kendaraan.

Di akhir abad ke-20 pengembangan EV meningkat seiring dengan semakin berkurangnya cadangan minyak bumi di dunia sebagai sumber energi utama penggerak kendaran bermotor dan makin meningkatnya polusi udara yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil yang banyak dipakai sebagai tenaga penggerak utama untuk kendaraan, pembangkit tenaga listrik dan lain-lain. EV atau HEVs dapat menghasilkan 10 kali lebih sedikit karbon dioksida (CO₂), menghasilkan 20 kali lebih sedikit nitrogen oksida (NO_x) dan menghasilkan partikel kecil lebih sedikit dibandingkan dengan kendaran konvensional [1].

Gagasan awal HEVs adalah menggabungkan dua sumber utama penggerak yaitu listrik dan bahan bakar fosil [2]. Sumber utama penggerak listrik menggunakan dua komponen utama yaitu motor sinkron permanen magnet dan super kapasitor/baterai. Penggunaan super kapasitor sebagai penyimpan energi utama merupakan hal yang sangat penting karena berhubungan dengan peningkatan kinerja (*improving performance*) kendaraan, keselamatan dan efisiensi biaya kendaraan [3]. Super kapasitor mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan baterai antara lain lebih ringan dan cepat di dalam pengisian listrik (*charging*), keandalan (*life cycles*) 25-30 tahun dan efisiensi yang tinggi (95%) [4].

2. METODOLOGI PENELITIAN

Analisis berbasis modul dilakukan untuk sistem kontrol PMSM. Dalam simulasi ini akan dibahas kinerja dari kontrol arus dan kecepatan sebagai komponen dari kontrol penggerak yang disimulasikan dan diimplementasikan pada *Power Electronics in Simulink* (PLECS) yang berbasis, MATLAB / SIMULINK. Dalam simulasi ini super kapasitor dan kapasitor digunakan sebagai komponen penyimpanan energi.

PLECS adalah suatu paket stimulasi yang dirancang khusus untuk sistem elektronika daya dan dapat digunakan untuk simulasi kombinasi sirkuit listrik dan program kontrol. PLECS juga merupakan alat yang digunakan untuk simulasi cepat rangkaian listrik dalam lingkungan *Simulink*.

Di dalam melakukan simulasi digunakan data-data dan parameter-parameter PMSM yang digunakan di dalam percobaan laboratorium. Parameter motorik dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data-data dan Parameter PMSM

Quantity	Value	Symbol
Base current	52 A	I
Base speed	722 rad/sec	ω
Base resistance	0.1620 ohm	Ω
d-axis inductance	0.0021 H	Ld
q-axis inductance	0.0024 H	Lq
PM flux linkage	0.3184 Vs	ψ
Inertia	0.95 kgm ²	J
Capacitor voltage	400 V	V
Number of pole pairs	8	p

2.1. Model Sistem Kontrol PMSM

PMSM terdiri dari subsistem mekanik dan listrik, yaitu:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r \tag{1}$$

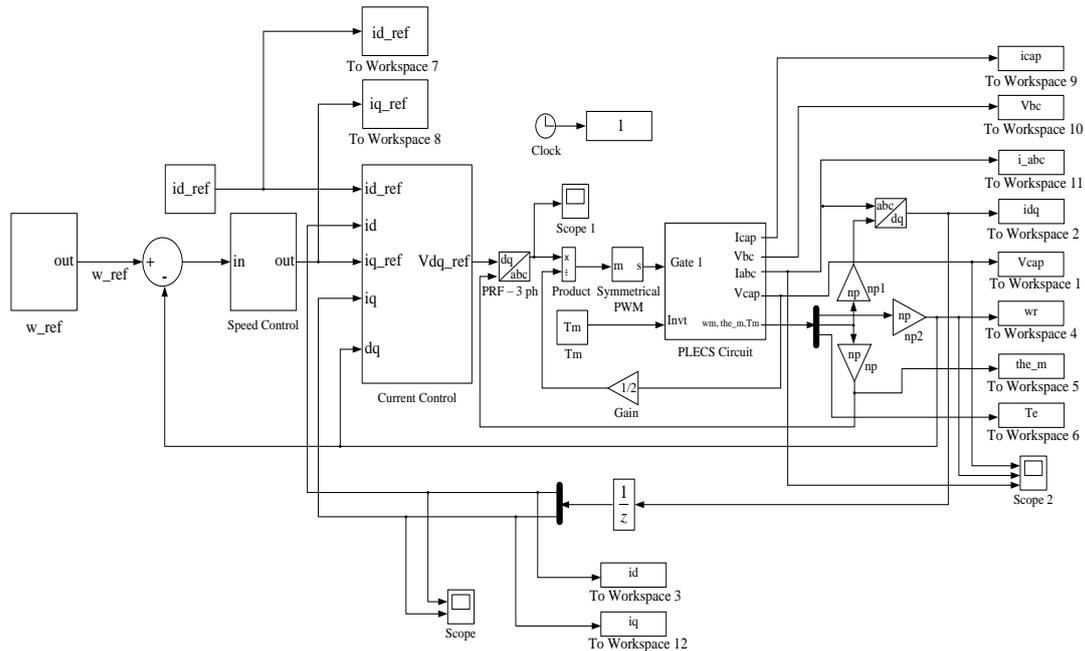
$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (Tm - Tt - B\omega_r) = \frac{1}{J} (k_t i_q - Tt - B\omega_r) \tag{2}$$

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (u_d + \omega_r L_q i_q - R i_d) \tag{3}$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_d} (u_q - \omega_r L_d i_d - R i_q - \omega_r \psi_m) \tag{4}$$

di mana (1) dan (2) mewakili subsistem mekanik, (3) dan (4) mewakili subsistem listrik. θ dan ω_r merupakan posisi dan kecepatan sudut motor. u_d and u_q merupakan tegangan stator sumbu dq, yang merupakan input kontrol. i_d dan i_q merupakan arus stator sumbu dq. R adalah hambatan stator. L_d dan L_q merupakan induktansi stator sumbu dq. J adalah inersia. B adalah faktor redaman dan ψ_m merupakan fluks magnet sumbu d [5].

Diagram blok sistem kontrol PMSM ditunjukkan pada Gambar 1. Seluruh sistem dapat dibagi menjadi tiga modul: pengontrol kecepatan, pengontrol arus, dan sirkuit PLECS, dimana setiap bagian modul memiliki fungsi yang unik. Secara berurutan bahwa ω_r^{ref} , T^{ref} , i_d^{ref} and i_q^{ref} merupakan referensi kecepatan sudut, referensi torsi, referensi arus tambahan sumbu d dan sumbu q.



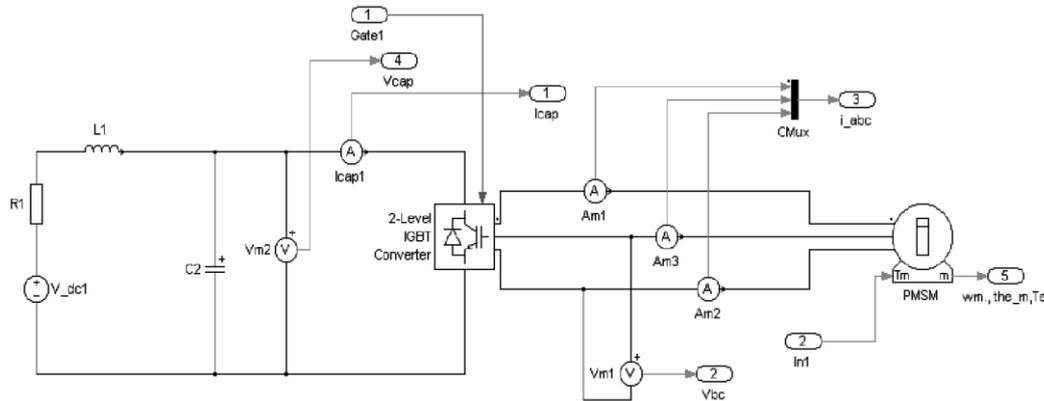
Gambar 1. Diagram Blok Sistem Kontrol PMSM

Hasil pengukuran kecepatan sudut ω_r , dikurangi dari kecepatan referensi ω_{ref} dan menghasilkan sinyal kesalahan (*error signal*) yang kemudian dimasukkan ke pengontrol kecepatan PI yang menyediakan arus referensi pada sumbu q. Arus referensi tersebut dibandingkan dengan umpan balik arus dan kecepatan arus listrik yang diperoleh dari pengukuran pada terminal motor. Keluaran dari pengontrol arus adalah tegangan pada sumbu dq, yang kemudian dikonversikan ke dalam tegangan tiga fasa.

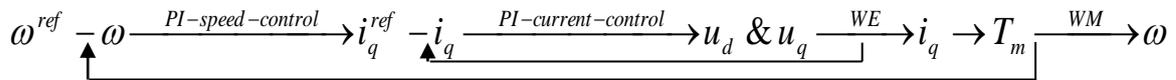
Dalam simulasi ini, digunakan komponen PWM simetris yang menghasilkan lebih banyak komponen harmonik daripada sampel simetris (*symmetrical sampling*) tetapi tidak dapat mencapai tingkat pembatalan harmonik (*cancellation harmonics*) yang sama seperti pengambilan sampel asimetris untuk topologi konverter. Oleh karena itu, digunakan skema PWM *simetris interleaved* dalam simulasi ini untuk mengurangi gangguan *differential-mode* dan *common-mode*. PWM simetris memiliki sangat sedikit *switching events* dan menghasilkan gelombang torsi rendah. Dalam PWM simetris, frekuensi sampling sama dengan frekuensi *switching* ($f_s = f_{sw}$).

Sirkuit PLECS pada Gambar 2., menggunakan super kapasitor sebagai komponen penyimpanan energi dan mempunyai kapasitas yang hampir sama dengan kapasitor biasa dengan pengecualian bahwa ia menawarkan kapasitansi yang sangat tinggi.

IGBTs dua tingkat memiliki satu penyalaan (*turn-on*) dan pemadaman (*turn-off*) per alat per siklus serta dapat melakukan kontrol keluaran tegangan AC dengan merubah lebar dari tegangan, dan / atau amplitudo tegangan DC. Pendekatan lain adalah memiliki beberapa pulsa per setengah siklus dan kemudian merubah lebar pulsa untuk merubah amplitudo tegangan AC. Alasan utama untuk melakukan itu adalah untuk dapat melakukan perubahan tegangan keluaran AC dan mengurangi harmonisa yang rendah.



Gambar 2. PLECS Circuit



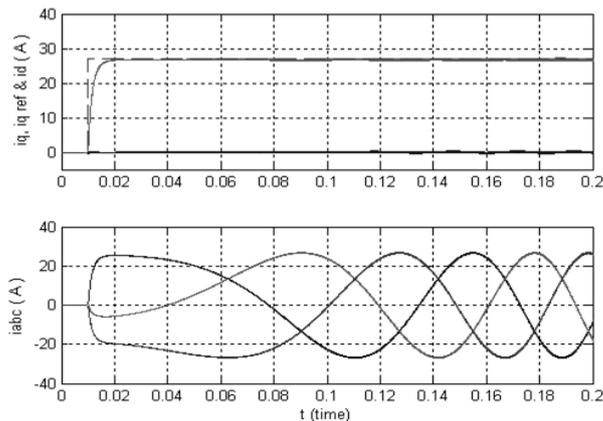
Gambar 3. Aliran Kontrol Sinyal

Aliran kontrol sinyal yang ditunjukkan pada Gambar 3., di mana WE adalah fungsi transfer dari subsistem listrik, sedangkan WM adalah fungsi transfer dari subsistem mekanik, dan i_d yang terkait dengan pengontrol PI dalam analisis selanjutnya diabaikan karena $i_d = 0$.

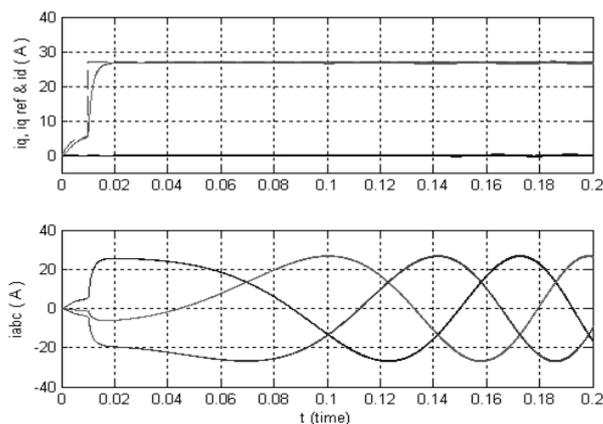
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kontrol Arus

Pada Gambar 4. memperlihatkan bahwa arus referensi sumbu q adalah 26 A dan arus sumbu d sama dengan nol ($i_d = 0$). Pada tiga fase arus sinusoidal, tidak terjadi gangguan (*noise*) yang mempengaruhi perilaku dari arus itu sendiri.



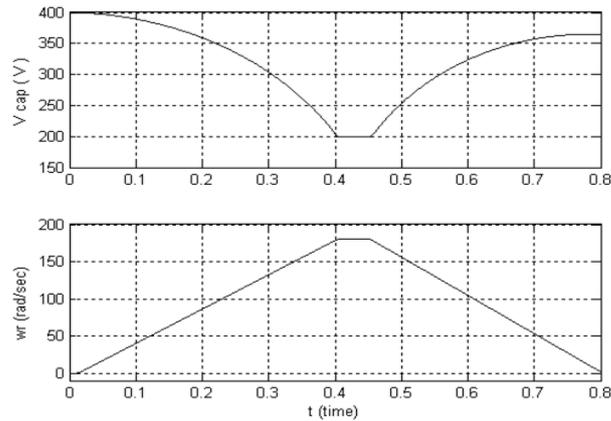
Gambar 4. i_d, i_q & i_q^{ref} and i_{abc}



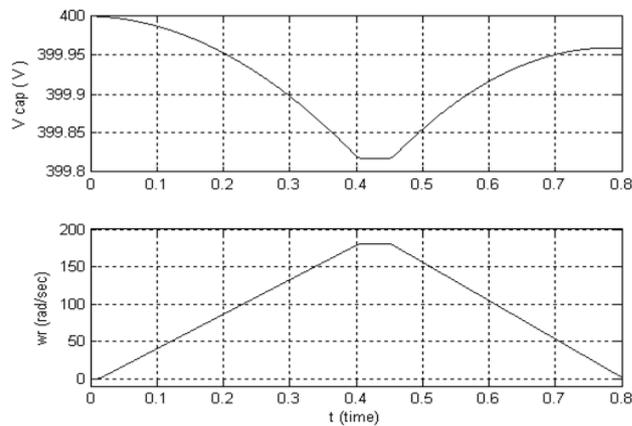
Gambar 5. i_d, i_q & i_q^{ref} dan i_{abc} untuk Kondisi Berbeban

Pada Gambar 5. memperlihatkan, ketika motor dinyalakan, beban menghasilkan lebih banyak arus sampai motor mencapai kondisi normal. Pada umumnya pengoperasian PMSM dimulai ketika tegangan sinusoidal tiga fase menyuplai stator dan tegangan menghasilkan arus sinusoidal tiga fase yang diperlukan oleh penggerak PMSM selama *start up* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Gambar 6. memperlihatkan bahwa komponen kapasitor memiliki tegangan (400 V) yang digunakan untuk menghasilkan PMSM. Tegangan besar diperlukan untuk *start* awal PMSM ketika kecepatan meningkat. Tegangan kapasitor akan berkurang ketika kecepatan ditingkatkan. Dalam arah yang berlawanan, ketika kecepatan menjadi menurun maka tegangan kapasitor akan meningkat. Sehingga dapat dikatakan bahwa PMSM dirubah sebagai generator yang menyimpan arus listrik ke kapasitor. Tegangan kapasitor meningkat tetapi jumlah tegangan kapasitor masih di bawah 400 V karena adanya rugi-rugi (*losses*).



Gambar 6. v_{cap} and $C = 6600\mu F$ (kapasitor)

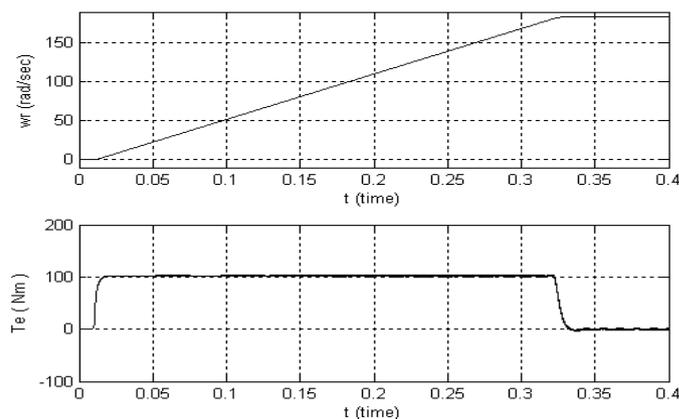


Gambar 7. v_{cap} and $C = 5.45F$ (super kapasitor)

Gambar 7. memperlihatkan bahwa PMSM menggunakan super kapasitor sebagai komponen penyimpanan energi dan penurunan tegangan yang terjadi lebih rendah dari 1 volt ketika penggerak PMSM dimulai dari nol hingga kecepatan 180 rad/detik. Dibandingkan dengan Gambar 6, penurunannya adalah 175 volt ketika penggerak PMSM dijalankan hingga kecepatan yang ditentukan. Sehingga dapat diketahui bahwa super kapasitor dapat menyimpan lebih banyak energi dan membutuhkan waktu yang singkat untuk diisi (*charged*) kembali.

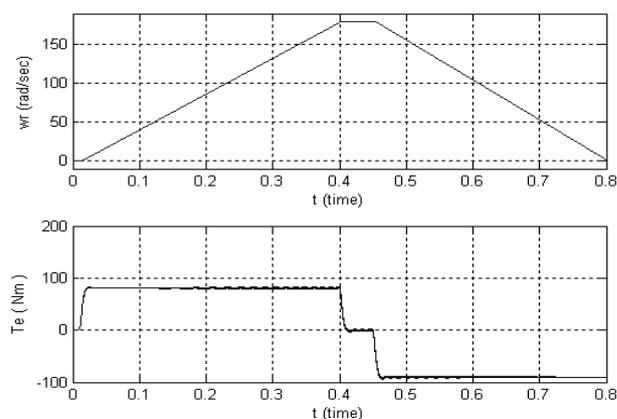
3.2. Kontrol Kecepatan

Gambar 8. memperlihatkan kecepatan rotor, ketika PMSM *start up* dari nol hingga mencapai kecepatan 180 rad/detik.



Gambar 8. Kecepatan rotor ω_r dan torsi listrik T_e , kondisi tanpa beban

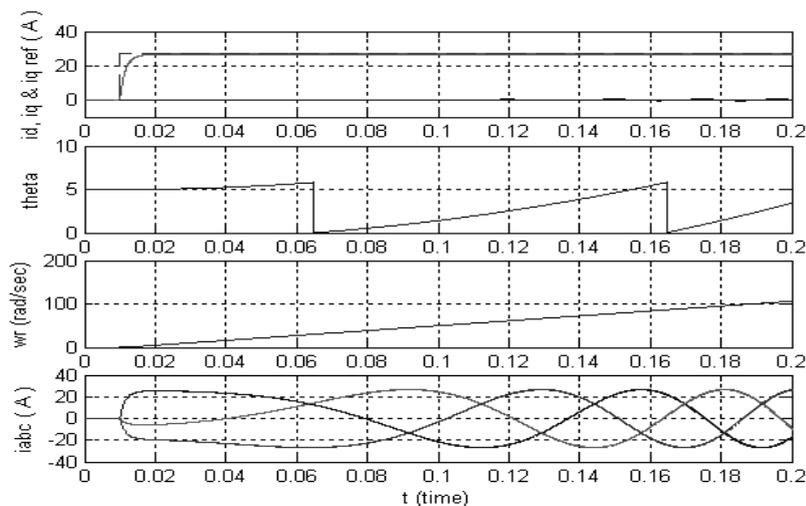
Respons kecepatan motor sedikit menjadi konstan setelah mencapai nilai tersebut dalam 0,35 detik. Torsi listrik dijaga konstan pada kemampuan maksimum mesin sementara motor berjalan hingga kecepatan mencapai $t = 0.35s$ dan kemudian turun menjadi nol ketika kecepatan konstan tercapai.



Gambar 9. Kecepatan Rotor $\omega_r = 180$ rad/detik dengan Kontrol dan Torsi T_e

Gambar 9. memperlihatkan bahwa jika percepatan kecepatan rotor meningkat maka torsi listrik menjadi konstan pada 90 Nm dan di sisi lain, torsi listrik menjadi konstan pada -90 Nm ketika percepatan kecepatan rotor menurun hingga mencapai nilai nol .

Hal tersebut diatas disebabkan karena torsi listrik dihentikan sehingga torsi listrik berputar ke arah yang berlawanan sementara kecepatannya menjadi menurun. Akibatnya, respons kecepatan menjadi asimetris terhadap torsi simetris dan itu terjadi jika $J \frac{d\omega}{dt} = T_e$. Torsi listrik aktual dikendalikan langsung oleh arus line (i_a, i_b, i_c) [6].



Gambar 10. Kinerja Gelombang pada Simulasi

Gambar 10. menunjukkan kinerja arus sumbu d-q, arus tiga fase dan kecepatan rotor, yang dilakukan dalam simulasi. Arus sumbu q memiliki waktu naik 0,004 detik. Perilaku arus sumbu d tidak dipengaruhi oleh i_q . Pada gambar di atas, arus basis (*base current*) adalah 52 A.

Referensi arus sumbu d i_d^{ref} pada gambar di atas hampir sama dengan arus *line* i_d . Ini menunjukkan bahwa kecepatan *start up* dari nol hingga 180 rad/detik yang mencapai 110 rad/detik selama 0,2 detik. Ketika posisi rotor melewati 5 rad, maka terjadi perubahan secara bertahap dari 2π menjadi nol dalam waktu 0,06 detik dan ini menyebabkan bahwa θ menjadi sangat besar selama satu atau dua sampel. Hasilnya menunjukkan bahwa sinusoidal arus tiga fase dapat diatur dengan baik.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

HEV menggabungkan mesin pembakaran internal konvensional dengan perangkat penyimpanan energi dan motor penggerak listrik pada kendaraan listrik. Hal ini dapat menjadi sistem alternatif untuk kendaraan listrik.

Motor sinkron magnet permanen menggabungkan, penggerak listrik dan komponen penyimpanan energi super kapasitor. PMSM sangat sesuai digunakan untuk HEV, karena mempunyai efisiensi tinggi, rotasi yang halus, sesuai untuk kontrol posisi tetapi mempunyai total biaya yang lebih tinggi daripada menggunakan motor DC.

Dengan meningkatkan nilai kapasitor, maka tegangan kapasitor menjadi besar. Tegangan kapasitor yang besar diperlukan untuk membangkitkan motor listrik. Oleh karena itu, kecepatan arus listrik dan nilai tegangan kapasitor dapat ditentukan dan ditingkatkan dengan merubah nilai kapasitor.

Hasil simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan PLECS pada MATLAB/SIMULINK dan PLECS, menghasilkan kinerja super kapasitor/kapasitor yang sangat baik sebagai salah satu komponen yang sangat penting di dalam kendaraan listrik hibrid/HEV dan dari hasil simulasi dapat juga diketahui bahwa super kapasitor dapat menyimpan lebih banyak energi dan membutuhkan waktu yang singkat untuk diisi (*charged*) kembali sehingga dapat disimpulkan bahwa super kapasitor mempunyai kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan baterai biasa.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Electric Power Engineering Department, Chalmers University of Technology, Swedia, yang telah memberi dukungan yang membantu pelaksanaan penelitian dan penulisan artikel.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. V. Mierlo, 2018. "Editorial: The World Electric Vehicle Journal, The Open Access Journal for the e-Mobility Scene.," World Electric Vehicle Journal 2018, 9, 1; doi:10.3390/9010001,
- [2] I. Vinay and Raju, "Hybrid Electric Vehicles, 2017." International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 50 Number 2 August 2017.,
- [3] P. a. T. L. Iora, 2019. "Effect of Ambient Temperature on Electric Vehicles' Energy Consumption and Range: Model Definition and Sensitivity Analysis Based on Nissan Leaf Data.," World Electric Vehicle Journal 2019, 10, 2; doi:10.3390/wevj10010002,
- [4] K. a. D. B. Sahay, 2009. "Supercapacitors Energy Storage System for Power Quality Improvement: An Overview," Journal of Electrical Systems,
- [5] J.-X. e. a. Xu, 2004. "A Modular Control Scheme for PMSM Speed Control With Pulsating Torque Minimization.," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 51, no.3, June, 2004., pp. pp.526-536.
- [6] N. S. T. a. U. K. Urasaki, 2003. "Investigation of Influences of Various Losses on Electromagnetic Torque for Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 18, no.1, January, 2003., pp. pp.131-139.