



Opis modelu fizycznego pojazdów napędzanych silnikami asynchronicznymi

Autor
youBy

Konsultacje i poprawki
Stele

Wersja 1

Legnica, 29.02.2016 r.

Zastosowany model fizyczny

Założenia wstępne

Pracę silnika można odwzorować przez hipotetyczną maszynę elektryczną, która zasilana jest jednofazowo napięciem skutecznym U o częstotliwości f i przy obracaniu się z prędkością obrotową f_s przepływa przez nią prąd o wartości skutecznej I_c przy współczynniku mocy $\cos \phi = 1$. Następnie uzyskane natężenie prądu I_c jest przeliczane na pracę trójfazową z uwzględnieniem współczynnika mocy $\cos \phi$, przez co otrzymuje się wartość skuteczną natężenia prądu jednej fazy I_f .

Silnik zasilany jest napięciem przemiennym sinusoidalnym trójfazowym. Napięcie to jest wytwarzane przez falownik, który jest w stanie wytworzyć napięcie o dowolnej częstotliwości.

Uproszczenia

W toku opracowywania modelu przyjęto następujące uproszczenia:

- indukcyjność i pojemność wirnika jest pomijalnie mała, przez co impedancja wirnika jest stała w całym zakresie pracy
- natężenie prądu płynącego przez wirnik jest wprost proporcjonalne do różnicy prędkości wirowania pola i wirnika
- moment napędowy bądź hamujący wytwarzany przez silnik jest wprost proporcjonalny do natężenia prądu płynącego przez wirnik i indukcji pola magnetycznego
- nie występują straty związane z przemagnesowywaniem stojana (zerowy prąd jałowy)
- sprawność silnika nie zależy od jego parametrów pracy (jest stała)

Opis parametrów w pliku konfiguracyjnym .fiz

Engine: EngineType=ElectricInductionMotor Trans=46:252 dfic=377 dfmax=0.98 p=2 cfu=46.8 cim=14.2 icif=0.671 Uzmax=2340 Uzh=2340 DU=20 I0=20 fcu=49 F0=130 a1=0 Pmax=1400 Fh=80 Ph=1000 Vh0=5 Vh1=10 lmax=557 abed=0 edep=0.95

Trans=X:Y

Przełożenie całkowite przekładni między silnikami trakcyjnymi i zestawem kołowym, którego wartość jest wyliczana ze wzoru:

$$Trans = \frac{X}{Y}$$

Podpowiedź: X i Y to liczby całkowite z zakresu od 1 do 255, stąd wartość przełożenia przekładni może zostać odwzorowana z błędem wynoszącym do ok. 0,5 %

dfic=X A/Hz

Współczynnik proporcjonalności między częstotliwością zasilania wirnika¹ a składową czynną natężenia prądu silnika w przeliczeniu na prąd stały. Odpowiednikiem fizycznym tego parametru może być opór wirnika (klatki) przy pominięciu jego (jej) indukcyjności.

dfmax=X Hz

Maksymalna częstotliwość zasilania wirnika w Hz. Odpowiada on za przeciążalność silnika, co przekłada się na maksymalną prędkość obrotową, przy której silnik jest w stanie utrzymać moc znamionową.

p=X

Liczba par biegunów. Odpowiada on za stosunek częstotliwości zasilania do częstotliwości wirowania pola magnetycznego stojana.

cfu=X V/Hz

Stała proporcjonalności określająca stosunek napięcia zasilania U do częstotliwości zasilania f, który odpowiada znamionowej wartości pola magnetycznego Φ . Jest ona wyliczana ze wzoru

$$cfu = \frac{U_{nom}}{f_{nom}}$$

gdzie U_{nom} to nominalne napięcie zasilania, a f_{nom} to nominalna częstotliwość zasilania. Odpowiednikiem fizycznym tego parametru może być indukcyjność uzwojeń stojana przy pominięciu ich rezystancji.

cim=X A/Nm

Stała proporcjonalności między prądem I_c pobieranym przez hipotetyczną maszynę (patrz: Założenia wstępne) a momentem znamionowym silnika przy znamionowej wartości pola magnetycznego Φ . Jest ona wyliczana ze wzoru:

¹ Częstotliwość ta jest różnicą między częstotliwością zasilania stojana (prędkość wirowania pola), a częstotliwością obrotów wirnika przy uwzględnieniu liczby par biegunów pola.

Opis modelu fizycznego pojazdów napędzanych silnikami asynchronicznymi

$$c_{im} = \frac{I_{cnom}}{M_{nom}}$$

gdzie: I_{cnom} to prąd znamionowy pobierany przez hipotetyczną maszynę, a M_{nom} to znamionowy moment obrotowy. Odpowiednikiem fizycznym tego parametru może być indukcja pola magnetycznego w warunkach znamionowej pracy silnika.

$i_{cif} = X$ A/A

Stała przeliczeniowa prądu hipotetycznej maszyny do prądu fazowego przy zasilaniu trójfazowym. Jest ona wyliczana ze wzoru

$$i_{cif} = \frac{I_{cnom}}{I_{fnom}} = \frac{1}{\cos\phi \cdot \sqrt{3}}$$

gdzie: I_{cnom} to prąd znamionowy pobierany przez hipotetyczną maszynę, I_{fnom} to znamionowy prąd fazowy, a $\cos\phi$ to znamionowy współczynnik mocy.

$U_{zmax} = X$ V

Maksymalne napięcie zasilania silnika przez falownik.

$U_{zh} = X$ V

Maksymalne napięcie zasilania silnika przez falownik podczas hamowania elektrodynamicznego.

$DU = X$ V

Spadek napięcia na falowniku podczas pracy.

$I_0 = X$ A

Prąd jałowy załączonego falownika.

$f_{cfu} = X$ V/Hz

Nastawa falownika w zakresie sterowania skalarne $U/f = \text{const}$. Jest ona wyliczana ze wzoru:

$$f_{cfu} = \frac{U_{zmax}}{f_c}$$

gdzie: U_{zmax} jak we wpisie, a f_c to częstotliwość zasilania silnika, przy której osiąga się napięcie U_{zmax} .

$F_0 = X$ kN

Maksymalna startowa siła pociągowa na postoju, kN.

$a_1 = X$ kN/(km/h)

Stała proporcjonalności odpowiadająca za spadek maksymalnej siły pociągowej wraz ze wzrostem prędkości. Jest ona wyliczana ze wzoru

$$a_1 = \frac{F_0 - F_l}{v_l}$$

gdzie: F_0 jak we wpisie, F_l to siła pociągowa na końcu liniowej części charakterystyki trakcyjnej, v_l to prędkość na końcu liniowej części charakterystyki trakcyjnej.

Opis modelu fizycznego pojazdów napędzanych silnikami asynchronicznymi

Pmax=X kW

Maksymalna moc pojazdu podczas rozruchu.

Fh=X kN

Maksymalna siła hamowania pojazdu.

Ph=X kW

Maksymalna moc pojazdu podczas hamowania elektrodynamicznego.

Vh0=X km/h

Maksymalna prędkość, przy której hamulec elektrodynamiczny jest wyłączony.

Vh1=X km/h

Minimalna prędkość, przy której hamulec elektrodynamiczny wytwarza pełną siłę hamowania.

Imax=X A

Maksymalny prąd, jaki może być pobierany przez pojazd z sieci trakcyjnej w czasie pracy.

abed=X

Współdziałanie hamulca elektrodynamicznego z hamulcem zespolonym. Jeśli hamulec elektrodynamiczny jest sterowany przez zawór rozrządczy (hamulec zespolony), wtedy X=1. Jeśli hamulec elektrodynamiczny nie jest w ogóle sterowany przez zawór rozrządczy (hamulec zespolony), wtedy X=0.

edep=X m/ss

Współczynnik maksymalnej siły hamowania, jaka może być generowana wspólnie przez hamulec ep i ed. Wartość współczynnika określa się w dwojaki sposób ze wzoru:

$$edep = \frac{Fh''}{m} = \frac{Fh' + Fepmax}{m}$$

gdzie Fh'' to minimalna siła hamulca elektrodynamicznego, przy której hamulec ep nie wytwarza siły hamowania, Fh' to maksymalna siła hamulca elektrodynamicznego, przy której siła hamowania hamulcem ep nie jest obniżana, Fepmax to maksymalna siła hamowania hamulca ep, a m to masa pojazdu.

Flat=X

Sposób zadawania siły pociągowej. Jeśli zadawana siła jest stała (płaska) w całym zakresie prędkości, wtedy w miejsce X trzeba wpisać Yes. Jeśli zadawana siła stanowi zawsze ułamek maksymalnie rozwijanej siły, wtedy w miejsce X trzeba wpisać No albo pominąć ten parametr.

SndS=X /Linijka Ctrl.

Współdziałanie hamulca elektrodynamicznego z elektropneumatycznym. Jeśli podczas hamowania przy prędkościach większych od Vh1 następuje wyłącznie hamowanie elektrodynamiczne, wtedy za X trzeba wpisać Yes. Jeśli przy prędkościach większych od Vh1 siła hamowania elektrodynamicznego jest uzupełniana hamulcem elektropneumatycznym, wtedy w miejsce X trzeba wpisać No albo pominąć ten parametr.

Obliczanie wartości parametrów fizyki na podstawie danych napędu

Aby obliczyć wartości parametrów dla fizyki konieczna jest znajomość dwóch rodzajów danych.

Dane dotyczące budowy pojazdu, tj. silników trakcyjnych i przekładni osiowych

Służą do obliczenia wstępnych możliwości trakcyjnych pojazdu. Należą do nich:

- przełożenie przekładni osiowej - i
- znamionowa częstotliwość zasilania silnika - f_{nom}
- moc znamionowa albo znamionowy prąd fazowy - P_{nom} albo I_f
- znamionowa prędkość obrotowa silnika albo częstotliwość zasilania wirnika - n_{nom} albo d_{fn}
- napięcie znamionowe - U_{nom}
- liczba par biegunów pola magnetycznego - p
- przeciążalność silnika - $przec$
- współczynnik mocy - $\cos\phi$
- sprawność - η

Na ich podstawie można obliczyć dodatkowe parametry:

- moc znamionowa (jeśli nie jest znana)

$$P_{nom} = I_f \cdot U_{nom} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\phi \cdot \eta$$

- znamionowy prąd fazowy (jeśli nie jest znany)

$$I_f = \frac{P_{nom}}{U_{nom} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\phi \cdot \eta}$$

- znamionowy prąd hipotetycznej maszyny jednofazowej

$$I_c = \frac{P_{nom}}{U_{nom} \cdot \eta}$$

- znamionowa prędkość obrotowa silnika (jeśli nie jest znana)

$$n_{nom} = 60 \cdot \frac{f_{nom} - d_{fn}}{p}$$

- znamionowa częstotliwość zasilania wirnika (jeśli nie jest znana)

$$d_{fn} = f_{nom} - n_{nom} \cdot \frac{60}{p}$$

- nominalny moment obrotowy

$$M_{nom} = \frac{P_{nom}}{n_{nom}} \cdot \frac{30000}{\pi}$$

- maksymalna częstotliwość zasilania wirnika (przy momencie krytycznym)

Opis modelu fizycznego pojazdów napędzanych silnikami asynchronicznymi

$$df_{max} = przec \cdot df_n$$

- stała c_{fu} silnika

$$c_{fu} = \frac{U_{nom}}{f_{nom}}$$

- stała c_{im}

$$c_{im} = \frac{I_c}{M_{nom}}$$

- stała df_{ic}

$$df_{ic} = \frac{I_c}{df_n}$$

- stała ic_{if}

$$ic_{if} = \frac{I_f}{I_c}$$

Dane dotyczące sterowania pojazdu, tj. zaprogramowane siły, moce i ograniczenia elektryczne

Służą do ostatecznego kształtowania charakterystyki trakcyjnej pojazdu. Niektóre pojazdy są wyposażone w podobne lub te same przekładnie i silniki trakcyjne, jednak mają inne możliwości trakcyjne ze względu na inne wartości nastaw w układzie sterowania. Do ww. danych należą:

- maksymalne napięcie zasilania silników trakcyjnych przez falownik - U_{zmax}

Podpowiedź: wartość U_{zmax} dla typowych silników trakcyjnych jest w zakresie 2100-2340V.

- maksymalne napięcie na zaciskach silników trakcyjnych podczas hamowania - U_{zh}

Podpowiedź: wartość U_{zh} dla typowych silników wynosi U_{zmax} , względnie ok. 2900 V.

- spadek napięcia na falowniku - DU

Podpowiedź: orientacyjnie wartość DU można przyjąć jako kilkanaście-kilkadziesiąt woltów.

- prąd jałowy falownika - I_0

Podpowiedź: orientacyjnie wartość I_0 można przyjąć jako 10-50 A.

- nastawa stałej zakresu sterowania skalarne $U/f = \text{const}$ - c_{fu}

Podpowiedź: nierzadko wartość nastawy c_{fu} falownika różni się od stałej c_{fu} silnika ze względu na optymalizację pracy rzeczywistego silnika trakcyjnego.

Opis modelu fizycznego pojazdów napędzanych silnikami asynchronicznymi

- maksymalna startowa siła pociągowa - F_0

Podpowiedź: czasami charakterystyki trakcyjne nie obejmują prędkości równej 0.

- współczynnik spadku siły pociągowej wraz z prędkością - a_1

Podpowiedź: współczynnik a_1 wynosi 0, jeśli siła pociągowa jest stałą do czasu osiągnięcia mocy maksymalnej. Jeśli charakterystyka trakcyjna w tym obszarze ma bardziej skomplikowany kształt, należy go przybliżyć linią prostą.

- maksymalna moc pojazdu - P_{max}

Podpowiedź: maksymalna moc pojazdu może (ale nie musi!) przekraczać łączną moc znamionową silników trakcyjnych.

- maksymalna siła hamowania elektrodynamicznego - F_h

Podpowiedź: maksymalna siła hamowania elektrodynamicznego zazwyczaj jest mniejsza niż maksymalna siła pociągowa.

- maksymalna moc hamowania elektrodynamicznego - P_h

Podpowiedź: maksymalna moc hamowania elektrodynamicznego jest ograniczona z różnych względów, np. do mocy ciągłej silników trakcyjnych lub mocy rezystorów hamowania.

- maksymalna prędkość, przy której hamulec elektrodynamiczny jest wyłączony - V_{h0}

Podpowiedź: w zależności od pojazdu wartość V_{h0} waha się od 0 do 5.

- minimalna prędkość, przy której hamulec elektrodynamiczny wytwarza pełną siłę hamowania - V_{h1}

Podpowiedź: w zależności od pojazdu wartość V_{h0} waha się od 5 do 10. Jeśli $V_{h1} > V_{h0}$, to w czasie hamowania pojazd łagodnie wyłącza hamulec elektrodynamiczny i zastępuje go elektropneumatycznym. Jeśli $V_{h1} = V_{h0}$, to nastąpi skokowe przełączenie hamulców.

- maksymalne natężenie prądu pobieranego przez pojazd z sieci trakcyjnej - I_{max}

Podpowiedź: ograniczenie I_{max} może powodować spadek mocy pojazdu wraz ze spadkiem napięcia. Niektóre pojazdy mają regulowaną wartość I_{max} przez maszynistę. Dla tych pojazdów należy wpisać najwyższą dopuszczalną wartość.

- współdziałanie hamulca elektrodynamicznego z hamulcem zespolonym - $abed$

Podpowiedź: znaczna liczba pojazdów w Polsce nie ma tej możliwości, tzn. hamowanie hamulcem zespolonym powoduje wyłączenie hamulca elektrodynamicznego.

Opis modelu fizycznego pojazdów napędzanych silnikami asynchronicznymi

- maksymalna siła hamowania uzyskiwana przy połączeniu hamulca elektropneumatycznego i hamulca elektrodynamicznego - eped

Podpowiedź: człony (wózki) napędowe nowoczesnych zespołów trakcyjnych mogą wytwarzać łączną siłę hamowania znacznie większą niż człony (wózki) toczne. Jeśli wartość eped będzie zbliżona do opóźnienia hamowania całego pojazdu, wtedy hamulec elektrodynamiczny będzie najpierw zastępować hamulec cierny członu (wózka) napędowego, a dopiero potem członów tocznych. Jeśli wartość eped będzie znacznie przekraczać opóźnienie hamowania całego pojazdu, wtedy hamulec elektrodynamiczny będzie zastępować hamulec cierny wszystkich członów (wózków) jednocześnie.

- wielkość zadawana nastawnikiem jazdy

Podpowiedź: zasadniczo można wyróżnić dwa rodzaje zadawanych wielkości: względna wartość siły pociągowej (momentu) – odniesiona do największej aktualnie możliwej do zadania siły – oraz bezwzględna wartość siły pociągowej (momentu) – zadawana w całym zakresie prędkości bez względu na aktualnie możliwą do uzyskania siłę

- sposób hamowania hamulcem elektrodynamicznym

Podpowiedź: w pojazdach można wyróżnić rozwiązania, gdzie hamowanie jest wyłącznie elektrodynamiczne oraz gdzie siła hamowania elektrodynamicznego jest uzupełniana hamulcem elektropneumatycznym.