

Minimalizacja strat mocy w silniku obcowzbudnym prądu stałego

Streszczenie. W artykule przedstawiono analityczną metodę pozwalającą na wyznaczenie wartości prądu wzbudzenia dla pracy optymalnej silnika obcowzbudnego prądu stałego, dla założonego obciążenia i prędkości obrotowej. Poprawę dokładności obliczeń uzyskano przez uwzględnienie nieliniowości obwodu wzbudzenia i wprowadzenie dodatkowych strat obciążeniowych. Badania porównawcze obliczonych wartości optymalnego prądu wzbudzenia z wartościami pomierzonymi wskazują na wystarczającą dokładność metody do zastosowań technicznych.

Abstract. The article presents an analytical method that allows determining the value of the excitation current for the optimal operation of a separately excited DC motor, for an assumed load and rotational speed. The accuracy of the calculations was improved by taking into account the nonlinearity of the excitation circuit and introducing additional load losses. Comparative studies of the calculated values of the optimal excitation current with the measured values indicate that the method is sufficiently accurate for technical applications. (*Minimization of power losses in a separately excited DC motor*)

Słowa kluczowe: silnik obcowzbudny prądu stałego, praca optymalna, minimalizacja strat mocy, optymalny prąd wzbudzenia
Keywords: separately excited DC motor, optimal operation, minimization of power losses, optimal excitation current

Wstęp

W komutatorowych silnikach prądu stałego pracujących przy zmiennych obciążeniach, podobnie jak w silnikach indukcyjnych, istnieje możliwość obniżania strat przez odpowiedni dobór wartości strumienia stosownie do aktualnego obciążenia. Parametrem zasilania, który minimalizuje straty całkowite w silniku jest odpowiednio sterowany prąd wzbudzenia. Pracę silnika z minimalnymi stratami mocy określamy jako pracę optymalną, natomiast prąd wzbudzenia realizujący ten tryb pracy nazywany jest optymalnym prądem wzbudzenia. Wartość optymalnego prądu wzbudzenia może być wyznaczona w różnoraki sposób:

- na drodze czasochłonnych i żmudnych pomiarów laboratoryjnych możliwych do realizacji w przypadku maszyn raczej niewielkich mocy,
- na drodze badań symulacyjnych w oparciu o znajomość parametrów maszyny i znajomość charakterystyk magnesowania i charakterystyk strat jałowych w zależności od prądu wzbudzenia [1,2],
- poprzez opracowanie algorytmu pozwalającego na analityczne wyznaczenie optymalnego prądu wzbudzenia z uwzględnieniem charakterystyk magnesowania i charakterystyk strat w żelazie w funkcji prądu wzbudzenia, który został przedstawiony w niniejszym artykule.

Rozważania związane z poprawą sprawności prowadzone są najczęściej przy założeniu stałej prędkości obrotowej, co sprawia, że pracę optymalną silnika dla dowolnego obciążenia można scharakteryzować przez podanie tylko optymalnej wartości prądu wzbudzenia. Kolejny parametr to prąd twornika, którego wartość związana jest z momentem obciążenia oraz napięcie zasilania twornika wynikające z konieczności zachowania stałej prędkości obrotowej.

Zagadnieniom minimalizacji strat w silniku obcowzbudnym poświęcono już wiele artykułów w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Jednym z pierwszych był [3], w którym autorzy przedstawili możliwość budowy algorytmu sterowania w oparciu o zależności pomiędzy stratami i linearyzacji charakterystyki magnesowania. Znaczącym był również [4], gdzie przedstawiono oryginalne sterowanie silnika na podstawie opracowanego dość skomplikowanego modelu strat. Od połowy lat dziewięćdziesiątych obserwuje się praktycznie

zanik zainteresowania problematyką minimalizacji strat w silnikach obcowzbudnych prądu stałego. Spowodowane to zostało przypuszczalnie coraz bardziej ekspansywnym wchodzeniem na rynki silników prądu stałego z magnesami trwałymi wysokoenergetycznymi typu BLDC. W ślad za tym zaczęła się pojawiać duża ilość artykułów poświęconych minimalizacji strat mocy w tego typu napędach, [5 - 8].

Niniejszy artykuł powraca do zagadnienia poprawy sprawności w konwencjonalnym obcowzbudnym silniku prądu stałego poprzez przedstawienie analitycznej metody wyznaczania optymalnej wartości prądu wzbudzenia z uwzględnieniem nieliniowości obwodu magnetycznego maszyny i pominięciu oddziaływania twornika.

Straty mocy w silniku obcowzbudnym

Wyprowadzenie pewnych zależności wiążących optymalny prąd wzbudzenia z założoną wartością momentu bądź mocy na wale wymaga uwzględnienia strat mocy powstających w silniku. Należą do nich:

- straty mocy w uzwojeniach obwodu wirnika P_w opisane zależnością (1)

$$(1) \quad P_w = R_{at} \cdot I_a^2$$

gdzie: R_{at} – rezystancja wszystkich uzwojeń połączonych w obwodzie twornika, I_a – prąd twornika.

Dla badanego silnika będzie to rezystancja uzwojenia twornika R_a , rezystancja uzwojenia komutacyjnego R_k oraz rezystancja reprezentująca straty dodatkowe obciążeniowe R_d wyznaczona wg zależności (6)

$$(2) \quad R_{at} = R_a + R_k + R_d$$

- straty przejścia na zestyku szczotki – komutator P_{pb}
Straty te można wyrazić zależnością (3):

$$(3) \quad P_{pb} = R_{pb} \cdot I_a^2 = 2\Delta U_b \cdot I_a$$

gdzie: R_{pb} – rezystancja przejścia między komutatorem a szczotkami, $2\Delta U_b$ – napięcie przejścia między komutatorem a szczotkami, którego wartość równa około 2 V praktycznie nie zależy od wartości prądu twornika.

- straty w uzwojeniach wzbudzenia dane równaniem (4):

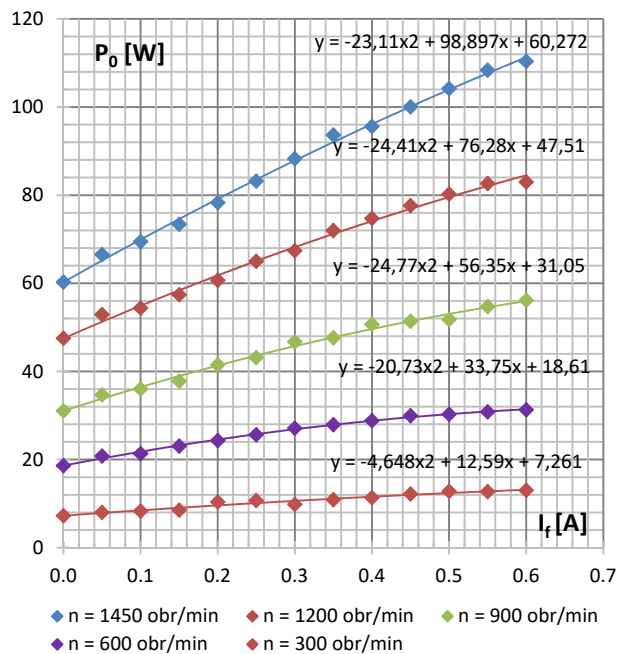
$$(4) \quad P_f = U_f \cdot I_f = R_f \cdot I_f^2$$

gdzie: U_f – napięcie zasilania obwodu wzbudzenia, I_f – prąd wzbudzenia, R_f – rezystancja uzwojenia wzbudzenia.

- straty biegu jałowego P_0 i straty w rdzeniu P_{Fe}

Straty mechaniczne P_m w maszynie prądu stałego powstają w wyniku tarcia w łożyskach, strat wentylacyjnych oraz strat tarcia szczotek o komutator. Straty mechaniczne są funkcją prędkości obrotowej. Przy stałej prędkości obrotowej wirnika straty mechaniczne w danej maszynie mają stałą wartość.

Do rozważań przyjęto wartości strat mechanicznych wyznaczonych z próby biegu jałowego dla wybranych prędkości obrotowych, rys.1. Ich wartość obrazuje wyraz wolny wielomianu drugiego stopnia, otrzymany poprzez aproksymację charakterystyki strat jałowych. Pozostała część wielomianu jest równaniem strat w rdzeniu $P_{Fe} = f(I_f)$. Straty te są generowane głównie w rdzeniu wirnika. Składają się ze strat od prądów wirowych i od histerezy związanej z przemagnesowywaniem obwodu magnetycznego.



Rys.1. Aproksymowane wielomianem drugiego stopnia charakterystyki strat biegu jałowego

- straty dodatkowe obciążeniowe P_d

Straty dodatkowe są proporcjonalne do kwadratu prądu obciążenia i można oszacować je według wzoru (5)

$$(5) \quad P_d = 0,01 \cdot P_N^* \cdot \left(\frac{I}{I_N}\right)^2$$

W celu uproszczenia obliczeń można je uwzględnić przez wyznaczenie rezystancji reprezentującej straty dodatkowe z zależności (6) i dodaniu jej do rezystancji obwodu twornika R_{at} :

$$(6) \quad R_d = \frac{0,01 \cdot P_N^*}{I_N^2}$$

Rezystancja zastępcza wyznaczona w powyższy sposób może być włączona zarówno do obliczeń symulacyjnych jak też innych obliczeń, kiedy zachodzi

potrzeba uwzględnienia strat dodatkowych obciążeniowych. W przypadku określenia strat dodatkowych obciążeniowych dla innej prędkości obrotowej niż znamionowa, można skorzystać z zależności;

$$(7) \quad P_N^* = P_N \cdot \frac{n}{n_N}$$

gdzie: n przyjęta nowa wartość prędkości obrotowej, n_N - znamionowa prędkość obrotowa.

Wyznaczenie zależności na optymalny prąd wzbudzenia

Wyprowadzenie zależności pozwalającej na analityczne wyznaczenie optymalnego prądu wzbudzenia możliwe jest przy następujących założeniach:

- stałej prędkości obrotowej i związanej z tym stałej wartości strat mechanicznych,
- uwzględnieniu charakterystyki magnesowania maszyny $U_0 = f(I_f)$,
- uwzględnieniu charakterystyki strat w rdzeniu w zależności od prądu wzbudzenia $P_{Fe} = f(I_f)$,
- pominięciu oddziaływania twornika.

Na początku należy wyznaczyć zależność opisującą prąd twornika w powiązaniu ze stratami mocy i obciążeniem silnika.

Moc wewnętrzną silnika P_e można przedstawić z pewnym przybliżeniem jako:

$$(8) \quad P_e = U_0 \cdot I_a$$

gdzie: U_0 – napięcie biegu jałowego równe w przybliżeniu napięciu indukowanemu w stanie obciążenia.

Moc wewnętrzną można przedstawić jako sumę następujących mocy:

- mocy na wale P ,
- mocy strat mechanicznych P_m ,
- mocy strat w rdzeniu P_{Fe} .

W związku z powyższym moc wewnętrzna będzie równa:

$$(9) \quad U_0 \cdot I_a = P + P_m + P_{Fe}$$

Wyrażenie na prąd twornika przyjmie postać:

$$(10) \quad I_a = \frac{P + P_m + P_{Fe}}{U_0}$$

Poszukiwanie optymalnej wartości prądu wzbudzenia wymaga uwzględnienia wszystkich strat występujących zarówno w stojanie, jak i wirniku.

Straty całkowite P_t będą równe:

$$(11) \quad P_t = P_w + P_{pb} + P_f + P_m + P_{Fe}$$

Uwzględniając wyrażenia na poszczególne straty, równanie przybierze postać:

$$(12) \quad P_t = R_{at} I_a^2 + 2\Delta U_b I_a + I_f^2 R_f + P_m + P_{Fe}$$

Podstawiając do zależności (12) wyrażenie na prąd twornika (10) otrzymuje się:

$$(13) \quad P_t = R_{at} \cdot \left[\frac{P + P_m + P_{Fe}}{U_0}\right]^2 + 2\Delta U_b \cdot \left[\frac{P + P_m + P_{Fe}}{U_0}\right] + P_{Fe} + I_f^2 \cdot R_f + P_m$$

Pochodna strat całkowitych względem prądu wzbudzenia będzie równa:

$$(14) \quad \frac{dP_t}{dI_f} = 2R_{at} \left[\frac{P + P_m + P_{Fe}}{U_0}\right] \frac{P'_{Fe}}{U_0} - 2R_{at} \left[\frac{P + P_m + P_{Fe}}{U_0}\right]^2 \frac{U'_0}{U_0} + 2\Delta U_b \cdot \frac{P'_{Fe}}{U_0} - 2\Delta U_b \cdot \frac{(P + P_m + P_{Fe})}{U_0} \cdot \frac{U'_0}{U_0} + 2R_f I_f$$

W powyższym równaniu (14) wyrażenia

$$(15) \quad P'_{Fe} = \frac{dP_{Fe}}{dI_f} \quad U'_0 = \frac{dU_0}{dI_f}$$

stanowią pochodną strat w rdzeniu względem prądu wzbudzenia oraz pochodną charakterystyki magnesowania względem prądu wzbudzenia.

Po przyrównaniu do zera równania (14) i dokonaniu przekształceń otrzymuje się równanie o postaci:

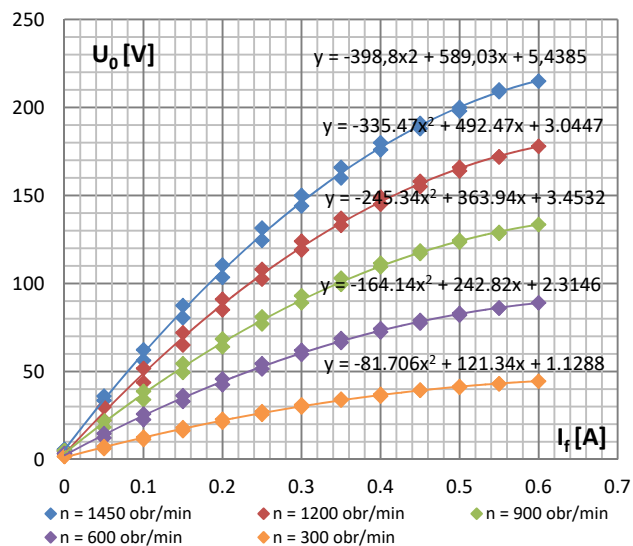
$$(16) \quad R_{at} \left[\frac{P + P_m + P_{Fe}}{U_0} \right] \frac{P'_{Fe}}{U_0} + \Delta U_b \frac{P'_{Fe}}{U_0} + R_f I_f + \frac{1}{2} P'_{Fe} = R_{at} \left[\frac{P + P_m + P_{Fe}}{U_0} \right]^2 \frac{U'_0}{U_0} + 2 \Delta U_b \left[\frac{P + P_m + P_{Fe}}{U_0} \right] \frac{U'_0}{U_0}$$

Rozwiązanie powyższego równania (16) pozwala na wyznaczenie optymalnej wartości prądu wzbudzenia ze względu na założoną wartość mocy na wale P . Można tego dokonać numerycznie korzystając z profesjonalnego programu np. „Mathcad” bądź „Mathematica”.

Zastosowanie powyższej metody wymaga znajomości następujących parametrów i wielkości:

- rezystancji uzwojeń obwodu wzbudzenia oraz obwodu twornika z uwzględnieniem rezystancji reprezentującej straty dodatkowe obciążeniowe dla maszyny nagrzonej,
- równania charakterystyki magnesowania silnika czyli zależności napięcia indukowanego dla biegu jałowego w funkcji prądu wzbudzenia dla wybranych prędkości obrotowych,
- równania strat jałowych i równania strat w rdzeniu silnika w funkcji prądu wzbudzenia dla wybranych prędkości obrotowych.

Na potrzeby metody należało przeprowadzić badania przygotowawcze, mające na celu wyznaczenie powyższych parametrów. Powyżej przedstawiono pomierzone aproksymowane charakterystyki magnesowania dla badanego silnika.



Rys.2. Aproxymowane wielomianem drugiego stopnia charakterystyki magnesowania dla wybranych prędkości obrotowych

Badania porównawcze charakterystyk prądu wzbudzenia pomierzonych i obliczonych

Pomiarów strat i sprawności oraz wyznaczenie na ich podstawie optymalnych wartości prądu wzbudzenia dokonano w układzie silnik obcowzbudny – wycechowana obcowzbudna prądnica prądu stałego. Dane znamionowe i rezystancje uzwojeń badanego silnika przedstawiono poniżej:

Typ PKBa 24a/101

$P_N = 1,1 \text{ kW}$, $U_N = 220 \text{ V}$

$I_N = 6,9 \text{ A}$

$I_{fN} = 0,5 \text{ A}$

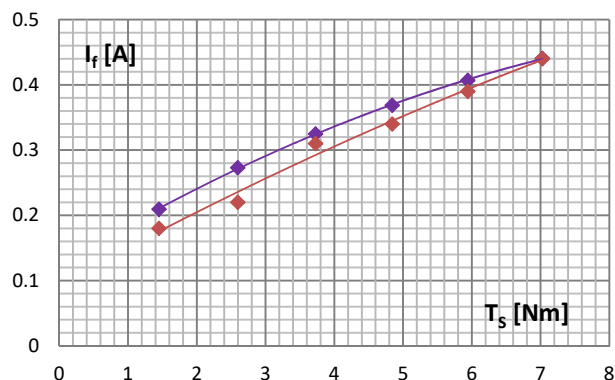
$n = 1450 \text{ obr./min.}$

rodzaj pracy: S1

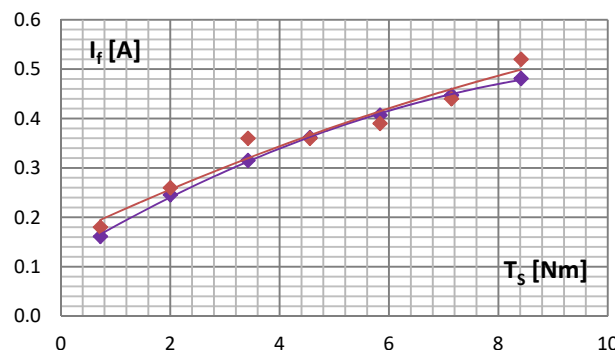
$R_{at} = 2,56 \ \Omega$ - rezystancja obwodu twornika w maszynie nagrzonej

$R_f = 470 \ \Omega$ - rezystancja obwodu wzbudzenia w maszynie nagrzonej

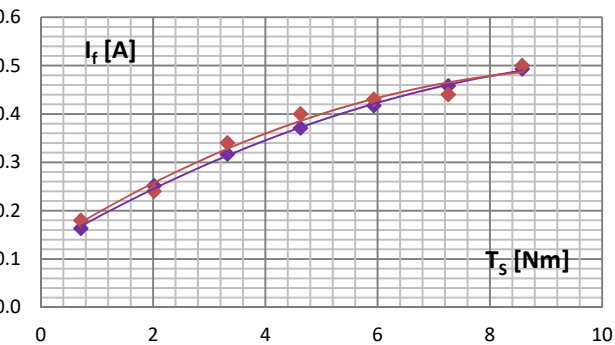
Na podstawie zależności (16) dokonano obliczeń optymalnych wartości prądu wzbudzenia dla założonych wartości momentu na wale T_s i przyjętych wartości prędkości obrotowych: $n=1450, 1200, 900, 600, 300 \text{ obr./min.}$ Charakterystyki otrzymane na podstawie obliczeń oznaczono kolorem niebieskim. Kolorem czerwonym oznaczono charakterystyki otrzymane na drodze pomiarów laboratoryjnych.



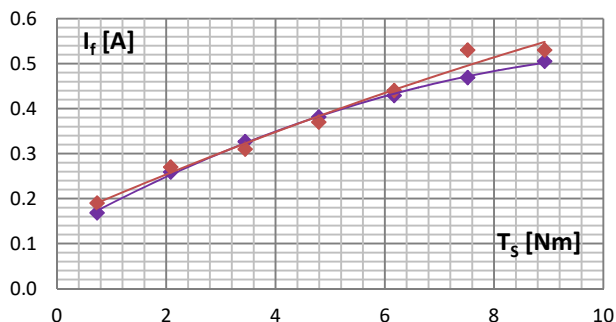
Rys.3. Pomierzone i obliczone charakterystyki optymalnego prądu wzbudzenia dla $n=1450 \text{ obr./min.}$



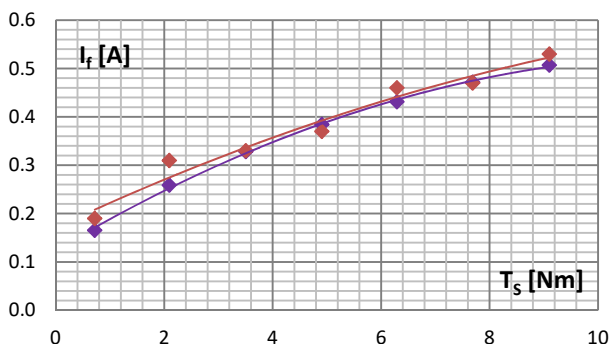
Rys.4. Pomierzone i obliczone charakterystyki optymalnego prądu wzbudzenia dla $n=1200 \text{ obr./min.}$



Rys.5. Pomierzone i obliczone charakterystyki optymalnego prądu wzbudzenia dla $n=900 \text{ obr./min.}$



Rys.6. Pomierzone i obliczone charakterystyki optymalnego prądu wzbudzenia dla $n=600$ obr./min.



Rys.7. Pomierzone i obliczone charakterystyki optymalnego prądu wzbudzenia dla $n=300$ obr./min.

Podsumowanie

Przedstawione badania porównawcze prowadzą do następujących wniosków:

- opracowany algorytm obliczania optymalnej wartości prądu wzbudzenia daje wyniki zbliżone do wartości wyznaczonych poprzez pomiar,
- poprawę dokładności wyznaczania optymalnego prądu wzbudzenia uzyskano przez uwzględnienie charakterystyki magnesowania oraz przedstawienie strat w rdzeniu w funkcji prądu wzbudzenia,
- kolejnym etapem poprawy dokładności obliczania optymalnego prądu wzbudzenia będzie uwzględnienie również oddziaływania twornika,
- opracowany algorytm obliczania optymalnej wartości prądu wzbudzenia może być zaimplementowany do układu sterowania pracą silnika obcowzbudnego prądu stałego

przy zmiennych obciążeniach, umożliwiając tym samym realizację pracy optymalnej czyli pracy z minimalnymi stratami,

- następnym etapem doskonalenia algorytmu będzie stworzenie możliwości dokonania obliczeń optymalnego prądu wzbudzenia dla dowolnego obciążenia i dla dowolnej prędkości obrotowej,

- wartości rezystancji wprowadzane do równania (16) powinny odpowiadać parametrom maszyny nagrzanej.

Autor: dr hab. inż. Henryk Banach, Politechnika Lubelska, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: h.banach@pollub.pl

LITERATURA

- [1] Bartosik G., Banach H.: Badania symulacyjne sprawności obcowzbudnego silnika prądu stałego w warunkach zmiennego n obciążenia. *Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne* nr 69/2004, str.175-177.
- [2] Bartosik G., Banach,H.: Praca optymalna obcowzbudnego silnika prądu stałego, *Przegląd Elektrotechniczny* 93 (2017) nr 2
- [3] Kusko A., Galler D.: Control means for minimization of losses in ac and dc motor drivers. *IEEE Transactions on Industry Application*, vol 1A-19, 1983 pp. 561-570.
- [4] Margaris N., Goutas T., Dowlgeir Z., Paschali A.: Loss minimization in dc drivers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 38 1991, pp 328-336.
- [5] Abhishek Sharma;Himanshu Negi;Deepak Punetha:Adaptive speed control of BLDC motor with effective starting and minimized cost and core loss, *2016 International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA)* (Spring) Year: 2016 | Conference Paper | Publisher:IEEE
- [6] Yong Keun Lee:Torque Ripple and Switching Power Loss Minimization with Constant Band Hysteresis Current Controller for BLDC Motor, *2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*,Year: 2019 | Conference Paper | Publisher: IEEE
- [7] Dileep Kumar;R. A. Gupta;Nitin Gupta: Minimization of current ripple and overshoot in four switch three-phase inverter fed BLDC motor using tracking anti-windup PI controller, *2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics,Communication and Energy Systems (SPICES)*, Year: 2017
- [8] Aritra Ghosh', Subhendu B. Santra, Manoj Kumar Maharana , Pravat Biswa:Torque ripple and efficiency optimization of a novel boost converter fed BLDC Motor Drive, *2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuication (ICCPEIC)*, Year: 2016 | Conference Paper Publisher: IEEE