

Daniam MAĆKIEWICZ

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy  
Dużych Maszyn Elektrycznych  
"Dolmal", Wrocław

DODATKOWE PROBLEMY W SILNIKU PRĄDU STAŁEGO  
PRZY ZASILANIU Z PRZEKSZTAŁNIKA TYRYSTOROWEGO

**Streszczenie.** W artykule omówiono dodatkowe problemy komutacyjne, mechaniczne i ciepłne, występujące w silniku prądu stałego przy zasilaniu z przekształtnika tyrystorowego. Podano między innymi prostą zależność pozwalającą oszacować dopuszczalną ze względów komutacyjnych falistość prądu twornika, omówiono dynamiczne obciążenia mechaniczne silnika, występujące przy dużych szybkościach zmian tego prądu oraz na przykładzie serii PW-100 silników wyciągowych przedstawiono podejście do wyboru rozwiązania konstrukcyjnego uzwojenia twornika ograniczającego wartość strat dodatkowych wydzielanych w tym uzwojeniu.

Rozwój energoelektroniki spowodował, że do zasilania silników w regulowanych napędach prądu stałego stosuje się obecnie najczęściej przekształtniki tyrystorowe. Tyrystorowy napęd prądu stałego w porównaniu z klasycznym układem Leonarda ma bowiem większą sprawność energetyczną i lepsze własności dynamiczne oraz wymaga mniejszej kubatury pomieszczeń instalacyjnych. W silniku zasilanym z przekształtnika tyrystorowego występują jednak dodatkowe obciążenia komutacyjne, mechaniczne i ciepłne, wynikające z właściwości przekształtnika. W dalszej części niniejszego artykułu poruszono niektóre zagadnienia dotyczące tych obciążeń, nie pretendując do wyczerpującego ich omówienia.

Napięcie na wyjściu z przekształtnika, poza wartością średnią, będącą funkcją jego kąta wysterowania, zawiera harmoniczne, których rząd zależy od liczby taktów przekształtnika, a wartość między innymi od kąta wysterowania, wobec czego przez obwód twornika silnika płynie prąd falisty  $i = I_0 + \sum_k I_k \sin \omega t$ . Wartość składowej  $I_0$  wynika z obciążenia silnika momentem hamującym (przy obciążeniu znamionowym  $I_0 = I_N$ ) zaś składowe zmienne  $I_k$  wynikają z odpowiednich harmonicznych napięcia wyprostowanego i indukcyjności obwodu obciążenia przekształtnika. Miarą zawartości składowych zmiennych w prądzie twornika jest współczynnik falistości  $W_1 = \sqrt{\sum I_k^2 / I_0^2}$ .

Liczby porządkowe harmonicznych  $k$  określa zależność  $k = kp$ , przy czym:  $k = 1, 2, 3, \dots$ ;  $p$  - liczba taktów przekształtnika. Dopuszczalną ze wzglę-

dów komutacyjnych wartość współczynnika falistości prądu twornika, dla silników dużej mocy, można oszacować z następującej zależności:

$$W_{id} = 0,4/e_{rN} \cdot k_D$$

przy czym:  $e_{rN}$  - średnia obliczeniowa wartość napięcia samoindukcji zezwolju komutującego przy znamionowym prądzie twornika  $I_N$  i znamionowej prędkości obrotowej  $n_N$ ;  $k_D = n_{max}/n_N$  - stosunek prędkości obrotowej przy odzwzbudzeniu silnika do prędkości znamionowej. Dla ograniczenia falistości prądu twornika do wymaganej wartości niezbędna jest odpowiednia indukcyjność obwodu obciążenia przekształtnika  $L = k_f L_{AC} + L_D$ , przy czym:  $k_f$  - współczynnik tłumienia indukcyjności obwodu twornika, zależny od częstotliwości podstawowej (znaczącej) harmonicznej, prądu;  $L_{AC}$  - indukcyjność obwodu twornika wyliczona wg znanych zależności dla przebiegów prądowych o częstotliwości  $f < 5$  Hz;  $L_D$  - indukcyjność dławika wygładzającego. Dla prawidłowego doboru indukcyjności dławika lub dla stwierdzenia, że jest on zbędny, konieczna jest znajomość wartości współczynnika  $k_f$ .

Przekształtnik pracujący w układzie mostka trójfazowego, stosowany zwykle w napędach średniej i dużej mocy, ma liczbę taktów  $p = 6$  i dlatego znaczącą składową zmienną w prądzie twornika jest szósta harmoniczna  $I_6$  o częstotliwości  $f = 300$  Hz. Praktyczne obliczenia można ograniczyć do tej składowej i wówczas współczynnik falistości prądu twornika  $W_{id} \approx W_{i6} = I_6/I_N$ . Pomierzony w dużych silnikach budowanych w "Doimelu" współczynnik tłumienia indukcyjności  $k_f = k_{300} = 0,5, \dots, 0,6$ . W produkowanych przez "Doimel" silnikach prądu stałego serii PW-100 o momentach obrotowych 230...500 kNm przeznaczonych do napędu urządzeń wyciągowych w górnictwie, współczynnik  $k_{300} \approx 0,6$ . Silniki te mają jednak taką indukcyjność obwodu twornika, że przy ich zasilaniu z trójfazowego motkowego przekształtnika tyrystorowego mogą pracować bez dławików wygładzających.

Właściwości dynamiczne przekształtnika tyrystorowego są takie, że może on powodować w obwodzie twornika wielkie szybkości zmian prądu  $dI/dt$ . Dopuszczalne ze względów komutacyjnych wartości  $dI/dt$  wynoszą:

- 20  $I_N/s$  dla silnika o litym jarzmie stojana;
- 200  $I_N/s$  dla silnika o blachowanym poprzecznym obwodzie magnetycznym.

Blachowanie poprzecznego obwodu magnetycznego wymagane jest głównie ze względu na duże wartości  $dI/dt$ . Zaprojektowanie silnika o szeroko pojętych parametrach komutacyjnych odpowiednich dla  $dI/dt = 150 \dots 200 I_N/s$  nie przedstawia obecnie większych trudności technicznych. Silnik o litym jarzmie stojana może zadowalająco pracować przy zasilaniu z przekształtnika tyrystorowego, jeśli będą odpowiednio zwolnione szybkości zmian prądu twornika  $dI/dt$ .

Składowe zmienne w prądzie twornika i jego duże szybkości zmian wywołują w silniku dodatkowe obciążenia mechaniczne. Prądy  $I_d$  wywołują zmienne momenty obrotowe, których częstotliwości nie zależą od prędkości obrotowej

silnika a wynikają z liczby taktów przekształtnika. Duże wartości  $dI/dt$  powodują, że silnik jest obciążany momentami dynamicznymi, wobec czego maksymalny moment obrotowy  $M_{\max} = k_d k_M M_N$ , przy czym:  $k_d$  - współczynnik dynamiczny;  $k_M$  - względna robocza przeciążalność momentem obrotowym;  $M_N$  - znamionowy moment obrotowy silnika. Wyznaczenie współczynnika  $k_d$  jest zwykle bardzo kłopotliwe. W wypadku jednak silnika oboowzbudnego napędzającego urządzenia wyciągowe, którego rozruch rozpoczyna się ze stanu zahamowanego, można w przybliżeniu założyć, że wał jest utwierdzony w płaszczyźnie działania hamulca mechanicznego i wówczas wyznaczenie współczynnika  $k_d$ , dla różnych wartości  $dI/dt = dM/dt$ , nie przedstawia większych trudności. Obliczenia wykonane w Dolmelu dla nowo projektowanej serii PW-200 silników wyciągowych o momentach obrotowych 640, 800 i 1000 kN.m wykazały, że już przy  $dI/dt = 50 I_N/s$  współczynnik dynamiczny wynosi około 1,5, wobec czego z tego względu ograniczono dopuszczalną szybkość zmian prądu do  $dI/dt \leq 50 I_N/s$ . W silnikach tych przy  $dI/dt = 200 I_N/s$  współczynnik  $k_d \approx 1,9$ , więc osiąga już wartość zbliżoną do największej możliwej  $k_d = 2$ , która odpowiada skokowej zmianie prądu (momentu obrotowego). Duże wartości  $dI/dt$  są także przyczyną dynamicznych obciążeń zamocowania osiek do rdzeni biegunów pomocniczych. Niestaranne wykonanie tego zamocowania może być przyczyną awarii silnika.

Składowe zmienne prądu twornika  $I_d$  zwiększają obciążenie cieplne silnika, bowiem wywołują dodatkowe straty mocy  $\Delta P = \sum I_d^2 R_d$ . W silnikach szybkobieżnych średniej i dużej mocy, a zwłaszcza jeśli silniki te mają regulację prędkości obrotowej przez odzwbudzanie, wymagane ze względów komutacyjnych ograniczenie falistości prądu jest zwykle tak duże, że dodatkowe obciążenia cieplne nie odgrywają większej roli. W silnikach wolnobieżnych dużej mocy, a zwłaszcza jeśli silniki te nie mają regulacji prędkości obrotowej przez ich odzwbudzanie, może zaistnieć konieczność obniżenia mocy w istniejącym silniku lub specjalnego zaprojektowania uzwojenia twornika w maszynie konstruowanej, jeśli zamierza się dopuścić możliwą ze względów komutacyjnych falistość prądu. Uzwojenie twornika jest zwykle najbardziej obciążonym cieplnie elementem, bowiem od jego wykorzystania zależą wskaźniki techniczno-ekonomiczne silnika i dlatego zarówno ze względu na nagrzewanie się tego uzwojenia, jak i na sprawność silnika należy dążyć do ograniczenia strat wywoływanych przez składowe zmienne prądu twornika. Rozwiązania konstrukcyjne uzwojenia twornika zmniejszające te straty ograniczają jednocześnie straty związane z procesem komutacji - zmniejszają więc łączne straty dodatkowe wydzielane w tym uzwojeniu.

Według danych projektowych przy podziale pręta twornika na jego wysokości na tę samą liczbę drutów równoległych, najmniejsze straty dodatkowe występują w uzwojeniu z przeplotem pręta w osłóce szlókowej, pośrednia wartość tych strat jest w uzwojeniu szablonowym (osłóki z główkami), a największe straty dodatkowe występują w uzwojeniu o prętach łączonych ze sobą za pomocą skuwek po stronie przeciwnej do komutatora. Rozwiązanie z przeplotem

tem pręta jest technologicznie kłopotliwe i kosztowne, szczególnie jeśli w rachubę wchodzi przeplot pręta podzielonego na trzy części. Uzwojenie szablonowe - dość dobre jeśli chodzi o straty dodatkowe - nie jest najbardziej korzystne ze względów komutacyjnych. W realnym projekcie silnika poszukuje się więc rozwiązania kompromisowego. W serii PW-100 silników wyciągowych zaprojektowano uzwojenia tworników o prętach podzielonych na wysokości na trzy izolowane druty równoległe i cewkach częściowo zamkniętych (z niepełnymi główkami). W takiej cewce dwa pręty (jeden pręt boku górnego i jeden pręt boku dolnego) połączone są z prętami sąsiednich cewek za pomocą skuwek. Rozwiązanie to umożliwia zastosowanie korzystnego pod względem komutacyjnym skrótu uzwojenia przy stratach dodatkowych tylko nieco większych niż w rozwiązaniu z uzwojeniem czysto szablonowym. Identyczne rozwiązanie uzwojenia twornika przewiduje się zastosować w silnikach wyciągowych serii PW-200.

Zdobyte doświadczenia konstrukcyjno-badawcze, omówione po części w niniejszym artykule oraz właściwości eksploatacyjne wykonanych silników pracujących w hutnictwie i górnictwie, pozwalają stwierdzić, że w biurze konstrukcyjnym Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Dużych Maszyn Elektrycznych oprowadzono projektowanie silników prądu stałego do zasilania z przekształtników tyrystorowych.

#### LITERATURA

- [1] Beier E.: Einfluss der Glättungsinduktivität auf Kommutierung und Leistung thyristorgespeister Gleichstrom-Nebenschlussmaschinen. Siemens-Zeitschrift 42(1968), H.10, s. 843.
- [2] Budig P.K.: Das Betriebsverhalten von mischstromgespeisten Gleichstrommaschinen. Elektrik 24 (1970), H.5, s. 167.
- [3] Praca zbiorowa. Projektowanie przekształtników tyrystorowych. WNT, Warszawa 1974.
- [4] Piątkiewicz A., Sobolski R.: Dźwignice T.I. WNT, Warszawa 1977.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Władysław Mizia

Wpłynęło do redakcji 5.IV.1982 r.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАТРУДНЕНИЯ ВЫСТУПАЮЩИЕ В ДВИГАТЕЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА,  
ПИТАЕМОМ ОТ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

## Резюме

В статье обсуждены дополнительные коммутационные, механические и тепловые нагрузки, имеющие место в двигателе постоянного тока при его питании от тиристорного преобразователя. Указана простая зависимость, позволяющая оценить допускаемую, по коммутационным условиям, волнистость тока якоря; обсуждены динамические механические нагрузки двигателя, появляющиеся при больших скоростях изменений этого тока, а также, на примере серии |PW-100-подъемных двигателей, представлен подход к выбору конструктивного решения якоревой обмотки, ограничивающей значение дополнительных потерь, выступающих в этой обмотке.

ADDITIONAL PROBLEMS IN DIRECT CURRENT MOTOR SUPPLIED  
BY A THYRISTOR CONVERTER

## Summary

Additional commutation, mechanical and thermal loads appearing in a direct current motor supplied by a thyristor converter are discussed. Among other things simple relation enabling assessing permissible current wave distortion due to commutation armature is given. Motor dynamic mechanical load appearing during rapid changes of that current is discussed and, basing on PW-100 version of colliery winder motor, the approach to armature winding design feature selection to limit the additional losses dissipated in that winding is presented.