

Roman Żarnowski
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

AUTONOMICZNA PRĄDNICZA INDUKCYJNA Z KASKADOWYM FALOWNIKIEM NAPIĘCIA

AUTONOMOUS INDUCTION GENERATOR WITH CASCADED VOLTAGE INVERTER

Abstract: In the paper a frequency and voltage stabilisation system of autonomous, self-excited induction generator (API) is presented. Electrical energy with uncontrolled parameters, produced by API is converted to sin wave output energy with constant frequency and voltage with the help of a cascade inverter. Output voltage stabilisation is performed in the DC intermediate circuit of the inverter. The control strategy and the way of adding voltages in the cascade inverter which allow to eliminate the most significant harmonics up to assumed harmonic number is defined. Simulation results are enclosed.

Wstęp

Zapotrzebowanie na autonomiczne źródła stabilnego napięcia i częstotliwości, obok rozległych sieci elektroenergetycznych powoduje, że stanowią one przedmiot licznych prac badawczych. Źródła te zasilają energią elektryczną odbiorców w sytuacjach np. pokatastrofalnych i stanowią podstawowe źródło energii na obszarach, gdzie nie jest możliwy dostęp do sieci elektroenergetycznej oraz są również zabezpieczeniem dla odbiorców wrażliwych na przerwy w dostawie energii elektrycznej.

Rodzaj wykorzystanej maszyny elektrycznej jako transmittera energii elektrycznej w energetyce opartej na źródłach autonomicznych jest jeszcze przedmiotem sporów i dyskusji inżynierskich. Jednak ciągle jeszcze kłatkowa maszyna indukcyjna, ze względu na prostotę swojej budowy, jak i korzystną cenę, może być powszechnie stosowanym przetwornikiem elektromechanicznym, wykorzystywanym zarówno w napędach elektrycznych, jak i w układach generowania energii elektrycznej.

W prądnicie indukcyjnej przyłączonej do sieci elektroenergetycznej moc bierna, potrzebna do wytworzenia pola magnetycznego, jest pobierana z tej sieci, a moc czynna oddawana do sieci. W przypadku **autonomicznej** prądnicy indukcyjnej (API), moc bierna musi zostać wytworzona przez lokalne źródło.

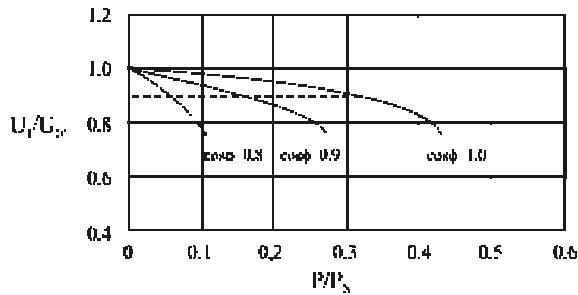
Na dzień dzisiejszy można przyjąć, że istnieją trzy podstawowe grupy API :

- API z komutowanymi stopniami baterii kondensatorów,

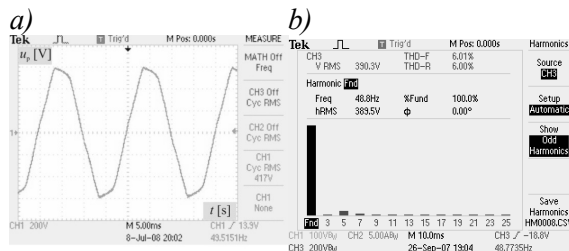
- API z dołączonym równolegle do maszyny i obciążenia przekształtnikowym źródłem mocy biernej,
- API z dołączonym szeregowo, tzn. między prądnicę i obciążenie, przekształtnikiem. Badania związane z API o wzbudzeniu kondensatorowym najczęściej dotyczą rozwiązania następujących problemów:
 - zapewnienia stałej, z określoną dokładnością, wartości napięcia wyjściowego, które bardzo zależy od wartości i charakteru obciążenia oraz prędkości obrotowej wału,
 - zapewnienia stałej częstotliwości generowanego napięcia przy zmieniającym się obciążeniu i zmiennej prędkości wału,
 - zapewnienie sinusoidalnego kształtu napięcia wyjściowego dla różnych warunków obciążenia.

Sformułowanie problemu

Parametry energii elektrycznej nieprzetworzonej, otrzymywanej z prądnicy indukcyjnej, zdecydowanie różnią się od oczekiwanych przez odbiorców, ponieważ zarówno amplituda jak i częstotliwość generowanego napięcia ulegają zmianom. Stopień wykorzystania mocy jak i zmienność napięcia takiej prądnicy pokazano na rys. 1. O praktycznym wykorzystaniu maszyny indukcyjnej jako prądnicy autonomicznej można mówić w kontekście jej współpracy z układami stabilizacji napięcia, a w przypadku wymagających odbiorców stabilizacji napięcia i częstotliwości.

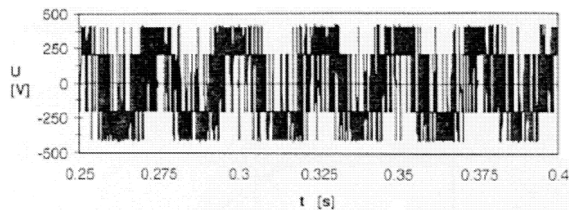


Rys. 1. Charakterystyka zewnętrzna API o wzbudzeniu kondensatorowym pracującej na 3-fazowe obciążenie symetryczne o różnym $\cos\varphi$



Rys. 2. Przebieg napięcia liniowego z API o regulowanej pojemności baterii kondensatorów wzbudzających –a) i jego widmo –b)

O ile w układach przekształtnikowych nie ma w zasadzie problemu zapewnienia stałości napięcia wyjściowego i częstotliwości, to pewnym problemem pozostaje nadal kształt napięcia wyjściowego. Jak widać z rysunku 2a i 2b nawet w przypadku prądnicy o komutowanych stopniach baterii kondensatorów, gdzie to napięcie powinno być sinusoidalne, takie nie jest. W zależności od wydatkowanego prądu zawiera ono 5 i 7 harmonicznych.



Rys. 3. Przykładowy przebieg czasowy napięcia API z przekształtnikiem z PWM

Gorzej przedstawia się sytuacja w API z przekształtnikiem z PWM. Wtedy napięcie wyjściowe ma kształt pakietu impulsów prostokątnych. O ile taki kształt napięcia jest dopuszczalny w układach napędowych, to każda prądnica, w tym autonomiczna prądnica prądu przemiennego, powinna być traktowana jako źródło napięcia sinusoidalnego, którego kształt nie zależy od wartości ani od charakteru obciążenia. W układach przekształtnikowych API jest to możliwe przy zastosowaniu filtrów.

Filtry są dodatkowym obciążeniem oraz zwiększają koszt, mas i gabaryty takich prądnic.

Rozwiązaniem problemu mogłyby być w obecnej chwili falowniki wielopoziomowe Bez PWM lub z PWM, jednak i one posiadają swoje wady. Istotnie zwiększa się liczba łączników półprzewodnikowych mocy w porównaniu z rozwiązaniami klasycznymi lub przy zmniejszonej liczbie tych elementów istnieje konieczność stosowania transformatorów sumujących lub separacyjnych. Nie bez znaczenia jest też stopień skomplikowania tych układów. Wprawdzie na dzień dzisiejszy znane są beztransformatorowe układy, zapewniające uzyskiwanie napięć schodkowych, takich jak falowniki z zerowym punktem zasilania, falowniki z diodami poziomującymi oraz falowniki z kondensatorami pływającymi [3], jednak wyeliminowanie transformatorów jest okupione 2÷4 krotnym zwiększeniem liczby półprzewodnikowych elementów mocy. Pojawia się zatem aktualny problem opracowania takich układów API, które zapewniłyby stałą amplitudę i częstotliwość napięcia wyjściowego przy zachowaniu jego sinusoidalnego kształtu bez stosowania filtrów, lub w przypadku bardzo wysokich wymagań odnośnie jakości parametrów generowanej energii elektrycznej, ograniczyłyby rolę filtrów.

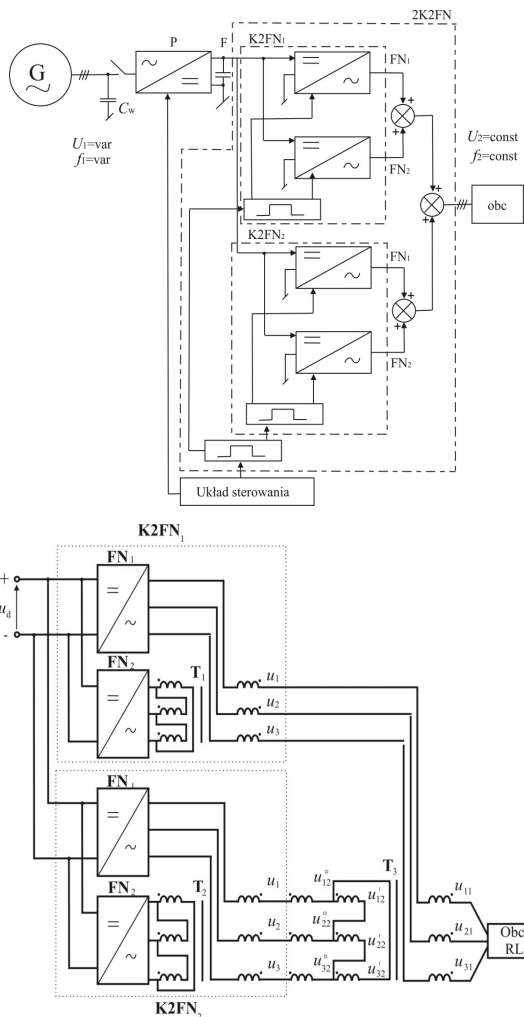
Próba rozwiązania przedstawionego problemu jest przedstawiony niżej układ API z przekształtnikiem kaskadowym, zapewniający pełną eliminację najbardziej znaczących harmonicznych tak, aby jakość uzyskiwanej energii elektrycznej była nie gorsza, niż określona normą [6] dla sieci niskiego napięcia.

Układ API zapewniający korzystne parametry energii elektrycznej

Zaproponowany układ API o wzbudzeniu kondensatorowym stanowi kontynuację badań nad analogicznymi układami w zastosowaniu do napędu [1, 2, 4].

Układ, którego schemat przedstawiono na rys. 4 składa się z maszyny indukcyjnej z wirnikiem klatkowym, baterii kondensatorów wzbudzających, przekształtnika AC/DC, członu pośredniczącego, oraz dwukaskadowego falownika napięcia [5], złożonego właśnie z dwóch falowników kaskadowych, z których każdy składa się z dwóch identycznych trójfazowych falowników o schodkowym kształcie napięcia wyjściowego, kącie przewodzenia $\lambda=\pi$ i odpowiednim kącie

przesunięcia fazowego β między momentami załączania łączników poszczególnych falowników, sterowanych bez PWM.



Rys. 4. Schemat blokowy układu API z falownikiem kaskadowym oraz ideowy falownika

Stałość amplitudy napięcia wyjściowego kaskady falowników jest zapewniona poprzez stabilizację napięcia członu pośredniczącego. Sumowanie napięć odbywa się za pomocą transformatorów o odpowiednio dobranych przekładniach i sposobach skojarzenia uzwojeń. Problemem do rozwiązania jest więc określenie warunków jakie należy spełnić, aby wyeliminować określone wyższe harmoniczne w napięciu wyjściowym falownika kaskadowego, dla zapewnienia wymaganej jakości energii. Fazowe napięcie na wyjściu pojedynczej kaskady np. dla fazy 1, można opisać równaniem:

$$U_1 = U_{A2C2} K_{T1} + U_{A1} \quad (1)$$

przy czym:

U_{A2C2} -napięcie międzyfazowe na wyjściu FN2,

U_{A1} - napięcie fazowe na wyjściu FN1,
 $K_{T1} = z_2/z_1$ -przekładnia transformatora,
 z_1, z_2 - liczba zwojów każdej z faz uzwojenia odpowiednio: pierwotnego i wtórnego.

Wykorzystując zależność (1), po licznych przekształceniach matematycznych dla sumowanych napięć, otrzymuje się równanie dla harmonicznej rzędu l napięcia fazowego na obciążeniu w postaci [6]:

$$U_{lj} = K_{T1} [U_d (2/l \pi) \sin l(\omega t + \beta) - U_d (2/l \pi) \sin l\omega t - 2\rho + \beta] + U_d (2/l \pi) \sin l\omega t \quad (2)$$

tu: $\rho = 2\pi/3$.

Przyrównując to równanie do zera i przekształcając je ponownie otrzymuje się warunki eliminacji l -tej harmonicznej. W tym wypadku 5 i 7.

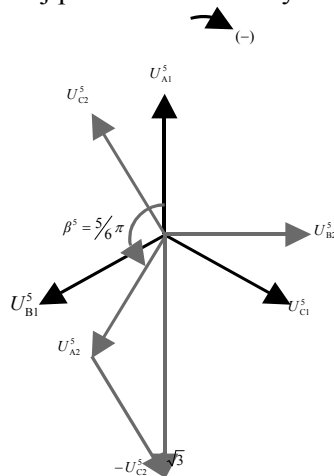
- kąt przesunięcia fazowego między momentami załączania zaworów FN₂ w stosunku do FN₁ $\beta = +\pi/6$, (wyprzedzenie),
- przekładnia transformatora $K_{T1} = z_2/z_1 = \sqrt{3}$.

W układzie kaskadowym zawierającym pojedynczą kaskadę równanie (1) dla 5 harmonicznej może być przedstawione następująco:

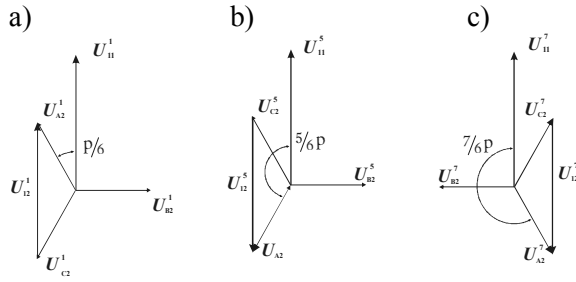
$$U_1^5 = K_T U_{A2C2}^5 + U_{A1}^5 = 0 \quad (3)$$

$$U_{A2C2}^5 = U_{A2}^5 - U_{C2}^5 \quad (4)$$

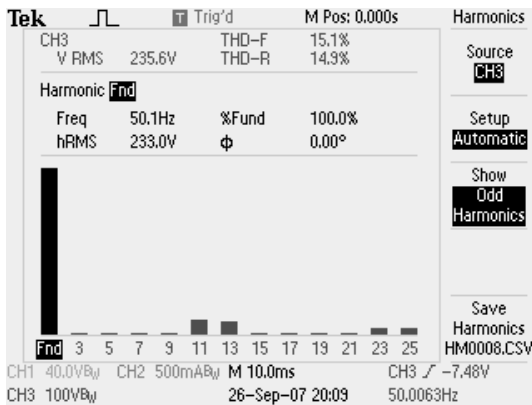
Identyczne warunki kompensacji otrzymuje się dla 7. harmonicznej. Sytuację na wyjściu pojedynczej kaskady obrazującą eliminację 5 i 7 harmonicznej przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Wykres wskazowy otrzymany na podstawie równania (3) dla harmonicznej przy założeniu przekładni $K_{T1}=1$



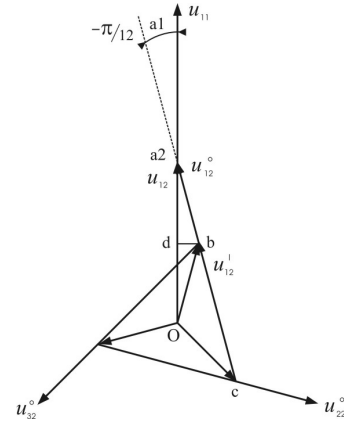
Rys. 6. Wykresy wskazowe napięć dla układu z rys.2: dla 1 harmonicznej -a), dla 5 harmonicznej -b), dla 7 harmonicznej -c)



Rys. 7. Widmo napięć wyjściowych pojedynczej kaskady falownika

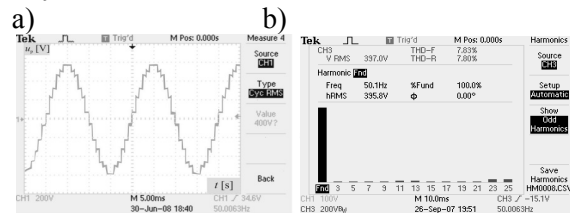
Przeprowadzona analiza wykazała, że w takim układzie możliwa jest pełna kompensacja kolejnych znaczących wyższych harmonicznych napięcia wyjściowego API. Kompensacja harmonicznych rzędu 5 i 7 oraz wyższych harmonicznych rzędu $l = 6(2k + 1) \pm 1$ odbywa się w falowniku kaskadowym K2FN₁. Kompensacja harmonicznych rzędu 11, 13 oraz wyższych rzędu $l = 12(2k + 1) \pm 1$, gdzie $k = 1, 2, 3, \dots$ następuje w falowniku dwu-kaskadowym 2K2FN (Rys. 4), dzięki opóźnieniu załączania zaworów falownika kaskadowego K2FN₂ względem K2FN₁ o kąt $\psi = -\pi/12$ oraz skojarzeniu zwojów uzwojenia pierwotnego transformatora sumującego T₃ w tzw. przedłużony trójkąt o przekładni $K_{T3} = z_2/z_1 = \sqrt{2}$, przy półgodzinnym przesunięciu napięcia wtórnego względem pierwotnego. Uzyskany na drodze badań laboratoryjnych przebieg napięcia wyjściowego API z przekształtnikiem dwukaskadowym, przedstawiono na rys. 9a, a odpowiadające mu widmo na rys. 9b. Postępując analogicznie jak w poprzednim przypadku, uzyskuje się warunki kompensacji wyższych harmonicznych rzędu $l = 12(2k \pm 1)$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots, m$, to jest 11 i 13 harmonicznej:

- przekładnia zwojowa transformatora $z_2/z_1 = \sqrt{2}$,
- układ połączeń uzwojeń Δ/λ ,
- kąt $\beta = -\pi/12$ opóźnienia sterowania zaworów K2FN₂ względem K2FN₁



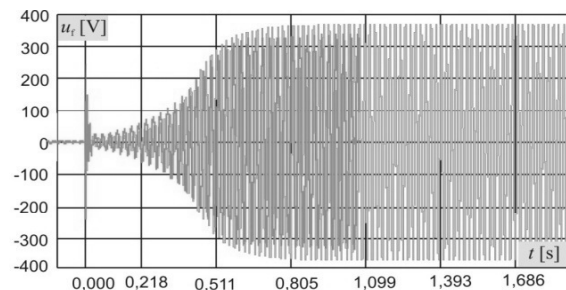
Rys. 8. Sposób przedstawienia napięcia 1 fazy w falowniku dwukaskadowym.

Na rysunku 7 przedstawiono zasadę powstawania napięcia 1. harmonicznej w fazie 1. układu z rys. 3.

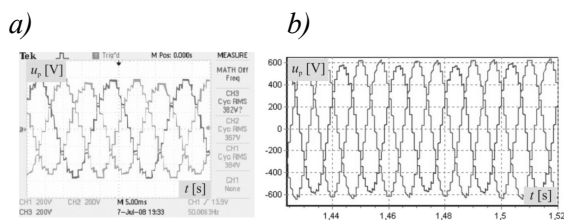


Rys. 9. Przebieg czasowy napięcia wyjściowego API z przekształtnikiem dwukaskadowym -a), oraz odpowiadające mu widmo -b)

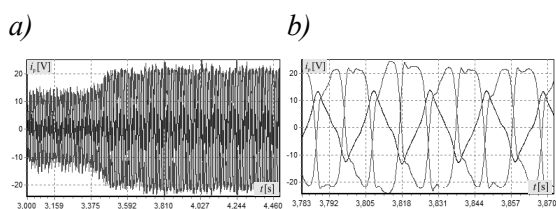
Model symulacyjny poddano weryfikacji (rys. 10 i 11) wykonując liczne badania porównawcze. Stopień przybliżenia wyników symulacyjnych ocenia się na ok. 7%.



Rys. 10. Przebiegi czasowe napięcia fazowego w procesie samowzbudzenia. Przebieg w modelu laboratoryjnym (żółty), na tle przebiegu symulacyjnego



Rys. 11. Przebiegi wyjściowego napięcia liniowego przy niesymetrycznym obciążeniu typu R-L; $\underline{Z}_A = 55 + j63 \Omega$, $\underline{Z}_B = 55 + j63 \Omega$, $\underline{Z}_C = 75 \Omega$, przebiegi rzeczywiste -a), przebiegi symulacyjne -b)



Rys. 12. Przebieg prądu wyjściowego w stanie zwarcia dwufazowego: stan przejściowy po wystąpieniu zwarcia -a), przebieg prądu w stanie ustalonym -b)

Wykorzystując opracowany model przeprowadzono liczne badania symulacyjne w stanach statycznych, dynamicznych (rys. 12a) oraz awaryjnych (rys. 12b).

Podsumowanie

Zaproponowany układ API z przekształtnikiem kaskadowym pozwala na uzyskiwanie prawie sinusoidalnego napięcia wyjściowego. Dzięki sprecyzowanym warunkom sterowania i sposobowi sumowania napięć w układzie falownika możliwe jest całkowite wyeliminowanie najbardziej znaczących harmonicznych napięcia do założonego rzędu włącznie. Współczynnik całkowitej zawartości wyższych harmonicznych napięcia *THD*, wynoszący dla rozpatrywanego układu praktycznie 7,83% (teoretycznie około 6%), jest mniejszy od wymaganego przez aktualną normę [7] dla sieci niskiego napięcia (8%).

Literatura

- [1]. Bodnar G. J., Plakhtyna O., G.: *Analiz garmonicznych składowych wychodnej naprugi trójfazowego autonomicznego generatora*. Teoretyczna Elektrotechnika, Wypusk 53, Lwów 1996.
- [2]. Gientkowski Z., Mućko J.: *Autonomiczna prądnicza indukcyjna o wzbudzeniu od przekształtnika tranzystorowego*. Przegląd Elektrotechniczny Nr 2, 2002.
- [3]. Hartman M.: *Wielopoziomowe falowniki napięcia*. Komitet Elektrotechniki PAN, Postępy Napędu

Elektrycznego i Energoelektroniki T.53, Gdynia 2006.

[4]. Płachtyna E.: *Matematyczne modelowanie elektro-maszynno-ventylnych sistem*. Izdztwo „Wiszcza Szkoła”, Lwów 1986

[5]. Plakhtyna O., Bodnar G., Kutsyk A., Plakhtyna I.: *Patent Nr 98073851 Ukraina, Przekształtnik napięcia stałego w trójfazowe*, Lwów 2000

[6]. Żarnowski R.: *Analiza i badania układu autonomicznej prądniczy indukcyjnej z kaskadowym falownikiem napięcia*. Rozprawa doktorska, Akademia Morska, Gdynia 2010

[7]. PN-EN 50160:2002 *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych*

Autor

Dr inż. Roman Żarnowski
 Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
 w Bydgoszczy, Instytut Elektrotechniki,
 Zakład Maszyn i Napędów Elektrycznych.
 ul. prof. Sylwestra Kaliskiego 7
 85-796 Bydgoszcz, Tel. (52)340 85 30
 E-mail: zarnov@by.home.pl