

mgr inż. JULIAN WOSIK
mgr inż. MAREK HEFCZYC
Centrum Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa EMAG
prof. dr hab. inż. BOGDAN MIEDZIŃSKI
Instytut Energoelektryki, Politechnika Wroclawska

Oddziaływanie energoelektronicznych przekształtników mocy zasilających duże odbiory na górnicze sieci elektroenergetyczne część II

W artykule omówiono sposoby opisu zawartości wyższych harmonicznych w odkształconych przebiegach napięć i prądów. Scharakteryzowano skutki występowania wyższych harmonicznych w kablowych sieciach zasilających odbiory górnicze. Przedstawiono wnioski wynikające z analizy pracy tych układów w obecności wyższych harmonicznych.

4. ANALIZA ODDZIAŁYWANIA PRZEBIEGÓW ODKSZTAŁCONYCH NAPIĘCIA I PRĄDU NA PRACĘ UKŁADÓW ZASILAJĄCYCH I ODBIORÓW

Do analizy odkształconych przebiegów napięć i prądów powszechnie wykorzystuje się rozkład okresowej funkcji niesinusoidalnej $f(t)$ na szereg Fouriera wg znanej zależności:

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega_1 t + b_k \sin k\omega_1 t) \quad (1)$$

gdzie:

- k – nr harmonicznej,
- ω_1 – pulsacja harmonicznej podstawowej,
- a_k, b_k – amplitudy harmonicznych.

Obecność poszczególnych składowych w tym szeregu zależy zarówno od kształtu analizowanego przebiegu odkształconego okresowego, jego charakterystyki, jak i od struktury obwodu elektrycznego.

W celu wyznaczenia (jak wiadomo) wartości współczynników a_0, a_k, b_k koniecznym jest, aby analizowana funkcja $f(t)$ (będąca w naszym przypadku przebiegiem napięcia lub prądu) spełniała warunki Dirichleta (tzn. była funkcją ciągłą całkowlaną

w sensie Riemana lub posiadała tylko ograniczoną ilość punktów nieciągłości pierwszego rodzaju).

W przypadku jednak przebiegów rzeczywistych ww. założenia mogą być niespełnione. Aproksymacja takich funkcji $f(t)$ szeregiem Fouriera w punktach nieciągłości jest jak wiadomo obciążona błędem znanym w literaturze pod nazwą fenomenu Wilbrahama – Gibbsa [18].

Umownie skutki oddziaływania przebiegów odkształconych można rozpatrywać w zależności od obecności stwierdzonego faktu odkształconego napięcia bądź od przepływu w torach prądowych prądów odkształconych (przy założeniu sinusoidalnego napięcia zasilającego).

Zdecydowaną większość odbiorów przemysłowych stanowią odbiory trójfazowe symetryczne (poza zgrzewarkami, piecami łukowymi itp.). W przypadku sieci górniczych większość odbiorów stanowią silniki elektryczne 3-fazowe, które zasilane są z sieci trójfazowych, 3-przewodowych, pracujących z izolowanym punktem zerowym, co skutkuje nieobecnością składowej zerowej w rozwinięciu funkcji w szereg Fouriera.

W układach rzeczywistych, na skutek jednoczesnego oddziaływania wielu odbiorów nieliniowych o różnych charakterystykach, mogą występować dość złożone funkcje opisujące przebiegi napięć i prądów w czasie, które często odbiegają od modeli teoretycznych, ponieważ zawierają subharmoniczne i interharmoniczne.

Tego typu przebiegi charakteryzuje szereg wskaźników, takich jak:

– współczynnik udziału k -tej harmonicznej $D_{(uk)}$:

$$D_{(uk)} = \frac{U_{(k)}}{U_1} \quad (2)$$

gdzie:

$U_{(k)}$ – wartość skuteczna k -tej harmonicznej,

U_1 – wartość skuteczna 1-szej harmonicznej.

– całkowity współczynnik odkształcenia harmonicznych (*total harmonic factor*) THF :

$$THF = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} (U_{(k)}^2)}}{U} \quad (3)$$

gdzie:

U – wartość skuteczna przebiegu odkształconego

– współczynnik niesinusoidalności napięcia h_{Du} :

$$h_{Du} = \frac{U_1}{U} = \frac{U_1}{\sqrt{U_1^2 + \sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}} \quad (4)$$

– współczynnik zawartości harmonicznych (*total harmonic distortion*) THD_u :

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} (U_k^2)}}{U_1} \quad (5)$$

– współczynnik zawartości harmonicznych (w przypadku występowania interharmonicznych) – *true harmonic distortion* – $TTHD_u$:

$$TTHD_u = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U_1} = \sqrt{\left(\frac{U}{U_1}\right)^2 - 1} \quad (6)$$

W tych przypadkach należy pamiętać, że analizując obwody dla poszczególnych wyższych harmonicznych nie można stosować do linearyzacji obwodu nieliniowego.

5. SKUTKI WYSTĘPOWANIA ODKSZTAŁCONYCH PRZEBIEGÓW NAPIĘĆ I PRĄDÓW

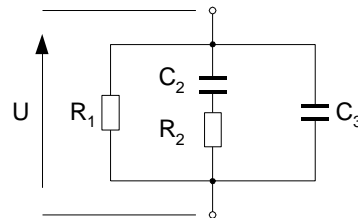
Skutki oddziaływania odkształconych przebiegów napięcia i prądu w czasie można rozpatrywać umownie w zależności od stwierdzenia obecności odkształconego napięcia zasilającego bądź od stwierdzenia przepływu w torach prądowych prądów odkształconych.

Należy podkreślić, że większość odbiorów w układach kopalnianych stanowią odbiory trójfazowe, symetryczne, tj. silniki elektryczne zasilane z sieci trójfazowej, trójprzewodowej. Oprócz nich mamy jednak do czynienia z kablami elektroenergetycznymi, transformatorami, bateriami kondensatorów statycznych oraz z siecią elektroenergetyczną jako układem złożonym.

Zatem w przypadku stwierdzenia obecności odkształconego napięcia na szynach rozdzielni elektroenergetycznych można oczekiwać pojawienia się szeregu niekorzystnych zjawisk:

a) Dla maszyn, transformatorów, kabli;

Analizując schemat zastępczy dla izolacji pokazany na rysunku 28,



Rys. 28. Schemat zastępczy izolacji maszyn elektrycznych, kabli, transformatorów

gdzie gałąź z rezystorem R_1 związana jest z prądami upływowymi izolacji, gałąź C_2 , R_2 związana jest ze stratami polaryzacji dielektryka, a gałąź C_3 odpowiada pojemności izolacji widać, że pod wpływem wyższych harmonicznych napięcia występują zwiększone straty mocy czynnej związane z polaryzacją dielektryka. W efekcie tego następuje wzrost temperatury i przyspieszone starzenie izolacji. Wzrost częstotliwości (obecność wh) wywołuje również zwiększony przepływ prądu pojemnościowego i wzrost mocy biernej.

b) W maszynach elektrycznych można oczekiwać poboru prądów odkształconych wymuszonych niesinusoidalnym napięciem zasilania. Skutkiem tego jest wzrost skutecznej wartości prądu w stosunku do harmonicznej podstawowej określonej zależnością:

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad (7)$$

oraz wzrost wartości strat mocy czynnej nie tylko w uzwojeniach stojana, ale także w uzwojeniach wirnika. Wyższe harmoniczne prądu powodują bowiem pojawienie się pól magnetycznych wirujących w maszynie o krotności wirowania ($\pm k \cdot \omega$), a więc także wzrost obciążenia prądowego wirnika:

$$\Delta P = 3R \cdot I^2 = 3R \cdot \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2 = 3R \left(I_1^2 + \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2 \right) \quad (8)$$

gdzie:

R – rezystancja zastępcza silnika.

Harmoniczne prądów pobieranych przez maszyny elektryczne wywołują jak wiadomo odpowiadające im momenty harmoniczne o różnych kierunkach oddziaływania.

Harmoniczne prądów o numerach

$(3k+1)$, np. 1, 4, 7, 10, 13 ...

wywołują momenty o kierunku zgodnym z kierunku wirowania wirnika,

$(3k+2)$, np. 2, 5, 8, 11, 14 ...

wywołują momenty o kierunku przeciwnym do kierunku wirowania wirnika,

$3k+3$, np. 3, 6, 9, 12 ...

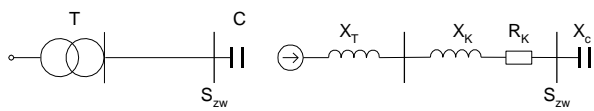
wywołują pulsujące pole elektromagnetyczne (tzw. harmoniczne kolejności zerowej).

W wyniku powyższego występują złożone momenty obrotowe, przy czym momenty kolejności zgodnej i przeciwnej w znacznej części wzajemnie się znoszą. Zatem przepływowi odpowiednich harmonicznych prądów nie towarzyszy wykonanie pracy użytecznej, lecz jedynie zamiana energii w ciepło Joula.

c) w kondensatorach elektroenergetycznych podobnie jak w izolacji maszyn można oczekiwać wzrostu strat mocy czynnej i przyspieszonego starzenia dielektryka, a ponadto wzrostu mocy baterii,

d) w przypadku przewodów elektroenergetycznych (kabli) wzrost strat mocy czynnej można rozpatrywać w aspekcie zmniejszenia dopuszczalnej obciążalności w stosunku do obciążalności określonej dla harmonicznej podstawowej [26].

e) w układach sieci zasilającej można oczekiwać występowania rezonansów szeregowego i równoległego [21, 22, 23, 24]. Dla przykładowego modelu sieci jak poniżej



gdzie:

X_T, X_K, X_C – reaktancje transformatora, kabla i kondensatora odpowiednio,

przy pominięciu rezystancji kabla R_K ($X_T+X_K \gg R_K$) warunek rezonansu szeregowego określa równość reaktancji:

$$|X_z| = |X_T + X_K| = |X_C| \quad (9)$$

Wyrażając zatem reaktancję zastępczą X_Z za pomocą mocy zwarcia S_{zw}

$$X_z = \frac{1,1U^2}{S_{zw}} \quad (10)$$

można określić częstotliwość rezonansową układu

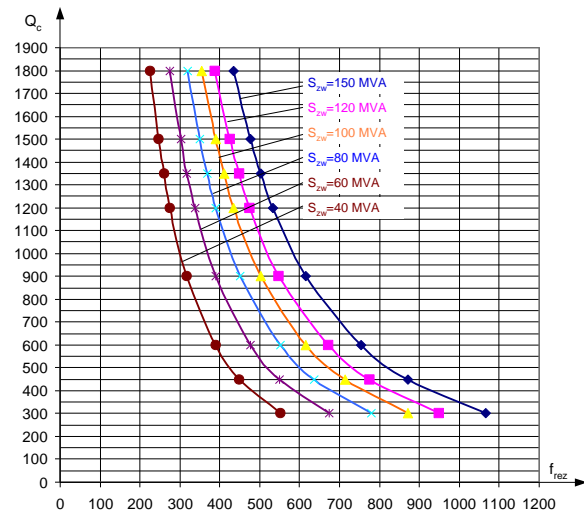
$$f_{rez} = \frac{S_{zw}}{2,2\pi U^2 C} \quad (11)$$

gdzie:

U – napięcie na szynach zasilających,

C – pojemność baterii kondensatorów.

Dla spotykanych praktycznie wartości pojemności C baterii kondensatorów oraz mocy zwarcia na szynach rozdzielni wyznaczone częstotliwości rezonansowe przedstawiono na rys. 29 [26].

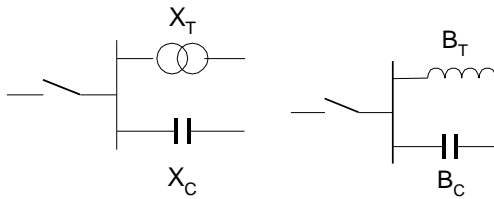


Rys. 29. Zależność częstotliwości rezonansowej od mocy baterii kondensatorów $f_{rez}=f(Q_c)$ przy stałej mocy zwarcia $S_{zw}=const$

Należy mieć jednak świadomość, że wartość częstotliwości rezonansowej ulega ciągłym zmianom w ciągu doby na skutek zmian konfiguracji po stronie systemu wytwórczego, przesyłowego i rozdzielczego oraz zmian pojemności sekcjonowanych baterii kondensatorów. W długich okresach czasu, w wyniku starzenia, ulegać mogą zmianom także nominalne pojemności kondensatorów.

Rezonans szeregowy jak wiadomo (przy napięciowym wymuszeniu) prowadzi do znacznych przetężeń ze wszystkimi tego skutkami (prąd ograniczony jest jedynie rezystancją układu). Zatem nawet niewielka, kilkuprocentowa, zawartość harmonicznej, dla której zachodzi rezonans szeregowy może wywołać w układzie przetężenia, przepięcia, zwarcia doziemne i międzyfazowe [25] z bardzo poważnymi skutkami dla układu.

W przypadku rezonansu równoległego, dla modelu sieci jak poniżej



Rys. 30. Schemat zastępczy modelu sieci do rezonansu równoległego

warunkiem wystąpienia rezonansu jest równość susceptancji

$$|B_T| = |B_C| \quad (12)$$

Moc bierna baterii kondensatorów Q_{bat} , przy której wystąpi rezonans równoległy określa zależność:

$$Q_{bat} = \frac{100S_T}{U_{z\%} k^2} \quad (13)$$

gdzie:

S_T – moc znamionowa transformatora,

$U_{z\%}$ – % napięcie zwarcia transformatora,

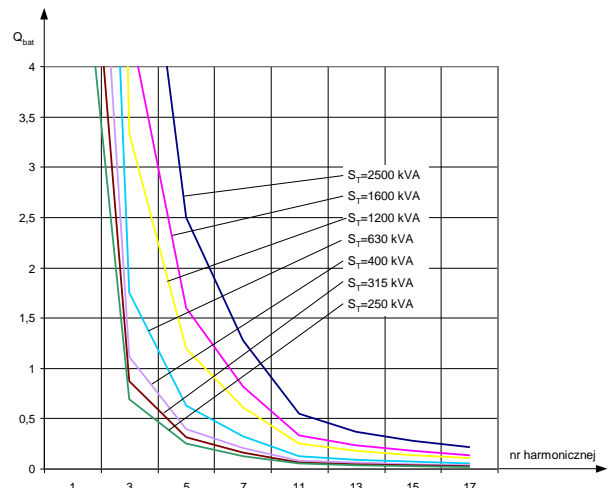
k – numer harmoniczej.

Zatem w przypadku wymuszenia napięciowego, w czasie rezonansu prądowego, wystąpi zmniejszenie wartości prądu we wspólnym torze oraz wzrost napięcia na zaciskach transformatora i baterii kondensatorów spowodowany zmniejszeniem spadków napięcia na wspólnej części toru. Skutkiem tego jest niewielki wzrost prądu pobieranego przez kondensator i transformator w stosunku do warunków normalnej pracy – zatem rezonans ten ma jedynie znaczenie lokalne.

Na rys. 31 przedstawiono zależność częstotliwości dla rezonansu równoległego od mocy baterii kondensatorów dla napięcia zwarcia transformatora $U_{z\%} = 4\%$ przy stałej mocy transformatora (w praktyce napięcie zwarcia U_z zawiera się w granicach 3,8÷4,8%).

Należy mieć również na uwadze, że po odłączeniu równoległego układu rezonansowego od zasilania może dojść do drgań oscylacyjnych tłumionych jedynie rezystancją układu. Może być to groźne dla całego układu.

W układach zasilających występowaniu odkształconych napięć towarzyszy zwiększony przepływ mocy biernej, co prowadzi do pogorszenia wartości współczynnika mocy $\text{tg } \varphi / \cos \varphi$ używanego w charakterze wskaźnika efektywności energetycznej w rozliczeniach z dostawcą energii (z rozkładu odkształconego napięcia na harmoniczne, przy uwzględnieniu charakteru indukcyjnego (R, L) obwodu wynika, że ze wzrostem numeru harmoniczej wzrasta



Rys. 31. Zależność częstotliwości rezonansowej od mocy baterii kondensatorów $f_{rez}=f(Q_c)$ przy stałej mocy znamionowej transformatora $S_{nT}=\text{const.}$ dla $U_z=4\%$

wartość reaktancji tego obwodu, a więc i kąt przesunięcia fazowego pomiędzy składowymi napięciami i odpowiadającymi im prądami).

Natomiast w przypadku występowania w torach prądowych odkształconych przebiegów prądów wywołanych nieliniowością odbiorów (zakłada się, że źródłem harmonicznych prądu są źródła prądowe po stronie odbiorów nieliniowych), można oczekiwać następujących niepożądanych efektów:

- w torach prądowych wzrostu strat moc czynnej, jak to przedstawiono wcześniej w punkcie b,
- wystąpienia odkształconych spadków napięcia na liniowych elementach sieci, a w efekcie wystąpienia odkształconego napięcia na szynach rozdzielń pośrednich,
- w obwodach rezonansowych szeregowych (przy wymuszeniu prądowym) może wystąpić jedynie niewielki wzrost prądu ograniczony dużą impedancją wewnętrzną źródła prądowego – źródła wyższych harmonicznych,
- w obwodach rezonansowych równoległych przy częstotliwości rezonansowej impedancja zastępcza obwodu rezonansowego, widziana z zacisków źródła prądowego, jest bardzo mała i występuje niekontrolowany przepływ prądu wyższych harmonicznych ze wszystkimi tego skutkami [20],
- w transformatorach obciążonych prądami wyższych harmonicznych głównym efektem jest wzrost strat mocy czynnej tak w uzwojeniach jak i w częściach metalowych (kadź, belki, itp.), co skutkuje wzrostem temperatury urządzenia i koniecznością obniżenia jego obciążalności w stosunku do obciążalności określonej dla podstawowej harmoniczej.

Powszechnie wiadomo, że całkowite straty mocy czynnej ΔP_c w transformatorze określane są zależnością:

$$\Delta P_c = \Delta P_{obc} + \Delta P_j \quad (14)$$

gdzie:

ΔP_{obc} – straty obciążenia,

ΔP_j – straty biegu jałowego.

$$\Delta P_{obc} = mI^2R + \Delta P_{wu} + \Delta P_{wk} \quad (15)$$

gdzie:

mI^2R – straty mocy czynnej w uzwojeniach o ilości faz m ,

ΔP_{wu} – straty mocy czynnej od prądów wirowych w uzwojeniach,

ΔP_{wk} – straty mocy czynnej od prądów wirowych w częściach metalowych (kadź).

Na ogół przyjmuje się, że straty w uzwojeniach (mI^2R) są niezależne od częstotliwości (pomija się wpływ zjawiska naskórkowości).

Przy obecności wyższych harmonicznych w prądzie obciążenia straty wirowe w uzwojeniach określane się zależnością:

$$\Delta P_{wu} = \Delta P_{wu} \sum_{k=1} \left(\frac{I_k}{I_n} \right)^2 \cdot k^2 \quad (16)$$

gdzie:

I_k – prąd harmonicznej k -tej,

I_n – prąd znamionowy,

k – numer harmonicznej,

ΔP_{wu} – straty mocy czynnej od prądów wirowych dla znamionowego prądu i częstotliwości.

(straty wirowe w uzwojeniach zależą od kwadratu wymiaru przewodnika w kierunku prostopadłym do strumienia rozproszenia. Przy końcach uzwojenia strumień ten ulega zakrzywieniu i wymiar prostokątnego przewodnika w kierunku prostopadłym do składowej wektora pola strumienia rozproszenia jest większy [27].

Straty dodatkowe ΔP_{wk} wywołane są przez strumień rozproszenia w rdzeniu, obejmach, kadzi i innych częściach metalowych.

Straty te zwykle określane się zależnością:

$$\Delta P_{wk} = \Delta P_{wk} \cdot \sum_{k=1} \left(\frac{I_k}{I_n} \right)^2 k \quad (17)$$

gdzie:

ΔP_{wk} – straty dodatkowe mocy czynnej określone dla znamionowego prądu i częstotliwości.

Podczas doboru transformatorów istnieją zatem różne sposoby uwzględnienia dodatkowych strat wywołanych obecnością prądów wyższych harmonicznych [27].

W USA w tym celu wprowadzono współczynnik „ K ”, zwany „współczynnikiem strat wirowych” określony zgodnie z zależnością:

$$K = \sum_{k=2} k^2 I_k^2 \quad (18)$$

gdzie:

I_k – względna wartość harmonicznej o nr k w stosunku do harmonicznej podstawowej.

Dla tak określonej wartości K dobierane są produkowane transformatory ze współczynnikiem $K \geq K_{oblicz}$. Współczynnik K wg szeregu znormalizowanego przyjmuje wartości 4, 9, 13, 20, 30, 40, 50. Transformatory wymiarowane z uwzględnieniem współczynnika K mają straty wirowe bardzo małe dla częstotliwości podstawowej.

W Europie stosuje się metodę szacowania stopnia obniżenia obciążenia standardowego transformatora dla warunków obciążenia go prądem odkształconym, przy którym to prądzie straty obciążeniowe nie przekraczają strat określonych dla częstotliwości podstawowej (tzn. strat projektowych). W tym celu określono współczynnik K zwany „współczynnikiem redukcji obciążenia transformatora w środowisku odkształconych prądów i napięć”.

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{k=2} k^q \left(\frac{I_k}{I_1} \right)^2} \quad (19)$$

gdzie:

e – stosunek strat wirowych przy częstotliwości podstawowej do strat czynnych (0,05÷0,10),

k – numer harmonicznej,

I – skuteczna wartość prądu,

I_k – skuteczna wartość prądu k -tej harmonicznej,

I_1 – skuteczna wartość prądu składowej podstawowej,

q – wykładnik – stała zależna od rodzaju uzwojenia i częstotliwości (przyjmuje się $q=1,7$ dla obu uzwojeń wykonanych przewodami o przekroju kołowym lub prostokątnym, $q=1,5$ – dla uzwojeń nawiniętych przewodem foliowym).

Dopuszczalną wówczas moc obciążenia transformatora S_T określa zależność:

$$S_T = \frac{S_{nT}}{1+K} \quad (20)$$

gdzie:

S_{nT} – moc znamionowa transformatora określona dla harmonicznej podstawowej.

Inna, alternatywna metoda określenia dopuszczalnej obciążalności transformatora standardowego do pracy w środowisku odkształconych napięć i prądów polega na zastosowaniu współczynnika $K_{\Delta P}$ zwanego

„współczynnikiem strat dodatkowych”. Współczynnik ten określa względny wzrost rezystancji przy odkształconych napięciach i prądach (a więc i wzrost strat czynnych) zgodnie z zależnością (22).

Oblicza się wówczas współczynnik wzrostu rezystancji $K_{\Delta R}$ zgodnie z zależnością:

$$K_{\Delta R}(f) = \frac{R_{AC}(f) - R_{DC}}{R_{AC}(f_1) - R_{DC}} \quad (21)$$

gdzie:

R_{DC} – szeregowo rezystancja zastępcza transformatora dla prądu stałego,

R_{AC} – szeregowo rezystancja zastępcza transformatora dla prądu przemiennego.

Rezystancja R_{AC} określana jest oddzielnie dla każdej harmonicznej.

Całkowitą wartość współczynnika strat dodatkowych $K_{\Delta P}$ określa zależność:

$$K_{\Delta P} = \sum_{k>1} K_{\Delta R}(f) \cdot \left(\frac{I_k}{I_n} \right)^2 \quad (22)$$

gdzie:

$K_{\Delta R}(f)$ – współczynnik wzrostu rezystancji,

I_k – prąd harmonicznej o numerze h ,

I_n – prąd znamionowy.

UWAGI KOŃCOWE

Obecność odbiorów nieliniowych w postaci energoelektronicznych przekształtników mocy w kopalnianych układach elektroenergetycznych ma trwałą tendencję wzrostową, skutkując istotnym odkształceniem przebiegów tak prądowych, jak i napięciowych.

Najgroźniejsze zjawiska związane z obecnością wyższych harmonicznych w dołowych elektroenergetycznych sieciach górniczych skutkują zmniejszeniem dopuszczalnej obciążalności stacji transformatorowych, wystąpieniem rezonansów szeregowych i równoległych oraz wzrostem czynnej straty mocy w przewodach elektroenergetycznych.

Niekorzystne oddziaływanie odkształconych przebiegów napięć i prądów na wszystkie elementy górniczych układów zasilających wymaga podjęcia niezbędnych działań technicznych ograniczających wpływ tego zjawiska.

Wskazane jest przede wszystkim zastosowanie takich środków technicznych, aby ograniczyć zawartość wyższych harmonicznych w napięciu roboczym zasilającym odbiory, odciążając stacje transformatorowe od przepływu prądów odkształconych.

Literatura

1. *Orłowska-Kowalska T.*: Stan obecny i tendencje rozwojowe napędu elektrycznego. Przegląd Elektrotechniczny 2004, nr 3.
2. *Kalus M., Skoczkowski T.*: Sterowanie napędami asynchronicznymi i prądu stałego. Wyd. Pracowni Komputerowej J. Skalmierskiego. Gliwice 2003.
3. *Szklarski L., Zarudzki J.*: Elektryczne maszyny wyciągowe. PWN, 1998.
4. *Głuziński W., Krasucki F.*: Elektryfikacja podziemi kopalń węgla. Cz. I. Podstawy elektryfikacji oraz urządzenia i sieci wysokonapięciowe. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1996 r.
5. *Chmiel J., Kasprzyk K., Poppe L.*: Wysokowydajny kompleks ścianowy z kombajnem Elektra na napięcie 3300 V eksploatowany na kopalni Wesoła, zastosowane nowoczesne maszyny i urządzenia w aspekcie sterowania produkcją z powierzchni. MiAG 2000, nr 11.
6. *Rosikowski J.*: Rozruchy przenośników zgrzeblowych zrealizowane za pomocą rozruszników tyrystorowych. Wiadomości Elektrotechniczne Nr 7-8/2003.
7. *Zdrzałek J., Mazurek T., Magaj R.*: Mechanizacja napędu wentylatora głównego szybu „Leopold” obejmującego łagodny rozruch i płynną regulację obrotów w celu regulacji ilości, prędkości i spiętrzenia powietrza wentylującego ZGE Sobieski Jaworzno III. EMAG, praca niepublikowana. Katowice 2001.
8. *Zdrzałek J., Brol J.*: Modernizacja stacji wentylatorów głównego przewietrzania usytuowanych przy szybie IV KWK Staszic. EMAG, praca niepublikowana, Katowice 2004.
9. *Trojan M. i inni.*: Sprawozdanie z pomiarów energetycznych sprzężarki TK16 w KWK Borynia. OPA-ROW, praca niepublikowana, Rybnik 2005.
10. *Halama A. i inni.*: Nowoczesny system zasilająco-sterujący do przenośników taśmowych o dużej zdolności transportowej. EMAG, praca niepublikowana, Katowice 2004.
11. Ognioszczelny rozrusznik tyrystorowy RTOCA.1 Karty katalogowe, Carboautomatyka SA Tychy (I_n do 450 A, $U_n=1000$ V).
12. Rozrusznik tyrystorowy ognioszczelny RTOCA ($I_n = 2 \times 450$ A, $U_n=1000$ V). Karta katalogowa. Carboautomatyka SA, Tychy.
13. Przemiennek częstotliwości ognioszczelnej PCO-315/1 ($P_{max}=315$ kW). Karta katalogowa. Carboautomatyka SA, Tychy.
14. Przemiennek częstotliwości ognioszczelnej PCO (60, 90, 160, 355, 500). Karta katalogowa. Carboautomatyka SA, Tychy.
15. Rozrusznik ognioszczelny tyrystorowy typu ROT-900-X. Karta katalogowa. ZEG SA, Tychy.
16. Rozrusznik ognioszczelny tyrystorowy typu ROT-800/N-2. Karta katalogowa. ZEG SA, Tychy.
17. Rozrusznik ognioszczelny tyrystorowy typu ROT-400/N-TR. Karta katalogowa. ZEG SA, Tychy.
18. *Hartman M.T.*: Fenomen Wilbrahama-Gibbsa. Wiadomości Elektrotechniczne 2007, nr 12, s. 21÷25.
19. *Cadler E., Noculak A.*: Wpływ odbiorników nieliniowych na straty przesyłu energii w liniach niskiego napięcia. Przegląd Elektrotechniczny 2007, nr 7-8, s. 37÷39.
20. *Pawłowski M., Fijałkowski Z.*: Rezonans prądów w sieciach przemysłowych 6 kV. MiAG nr 7, 2001. s. 36÷40.
21. *Pawłowski M.*: Wybrane problemy eksploatacji przemysłowej sieci zasilających z baterii kondensatorów do kompensacji mocy biernej. MiAG 2004, nr 7, s. 48÷52.
22. *Pawłowski M., Szymański A., Fijałkowski Z.*: Analiza przydatności modelu LCL z dwoma źródłami wyższych harmonicznych prądu do badania zjawisk rezonansowych w sieciach zasilających. MiAG nr 7, 2003, s. 107÷111.
23. *Pawłowski M., Szymański A., Fijałkowski Z.*: Wpływ baterii kondensatorów na możliwości powstawania rezonansu w sieciach zasilających. Przegląd Elektrotechniczny 2004, nr 6, s. 572÷574.
24. *Pawłowski M.*: Rozpływ mocy w warunkach rezonansu w sieciach zasilających odbiory nieliniowe. MiAG 2005, nr 7, s. 56÷63.
25. *Cichoń M., Szkółka St., Szymański A.*: Wyższe harmoniczne jako źródło strat energii w sieciach niskiego napięcia. MiAG 1999, nr 11, s. 41÷43.
26. *Adler E., Noculak A.*: Wpływ odbiorników nieliniowych na straty przesyłu energii w liniach niskiego napięcia. Przegląd Elektrotechniczny 2007, nr 7-8, s. 37÷39.
27. Harmoniczne. Dopuszczalna obciążalność i dobór transformatora do pracy z prądem odkształconym. Leonardo Power Quality Initiative. – poradnik.
28. *Kuśmierk Z.*: Współczynnik obciążenia transformatora zasilającego odbiorniki nieliniowe i jego pomiar. Przegląd Elektrotechniczny 2004, nr 6, s. 636-638.
29. *Miedziński B., Okraszewski Z., Szkółka St., Szymański A.*: Oddziaływanie przekształtników statycznych na sieć zasilającą podczas regulowanego rozruchu silników asynchronicznych. MiAG nr 6, 1999.
30. *Wosik J., Magaj R., Druźba E.*: Analiza zjawisk towarzyszących kompensacji mocy biernej w dołowych sieciach kopalnianych zawierających odbiory nieliniowe oraz opracowanie koncepcji ograniczenia ich oddziaływania. Praca niepublikowana. EMAG 2007. Katowice.
31. *Miedziński B., Okraszewski Z., Szymański A.*: Wyższe harmoniczne jako źródło zagrożenia pracy transformatorów zasilających odbiory wielkiej mocy. MiAG 1999, nr 11.