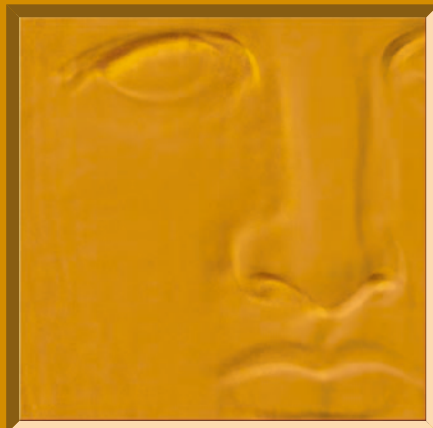
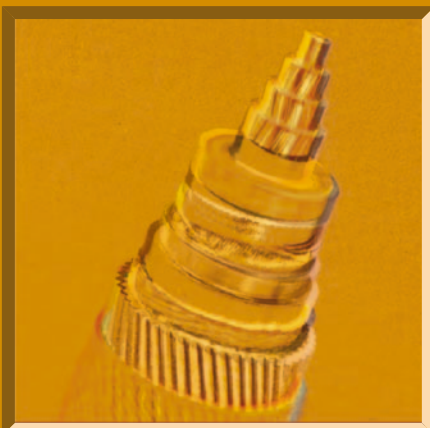


I GDZIE TU JEST „HARMONIA”?

Stefan Fassbinder
DEUTSCHES KUPFER-INSTITUT

Nr 14/11/2001



 BIBLIOTEKA
POLSKIEGO
CENTRUM
PROMOCJI
MIEDZI S.A.

Stefan Fassbinder
DEUTSCHES KUPFERINSTITUT

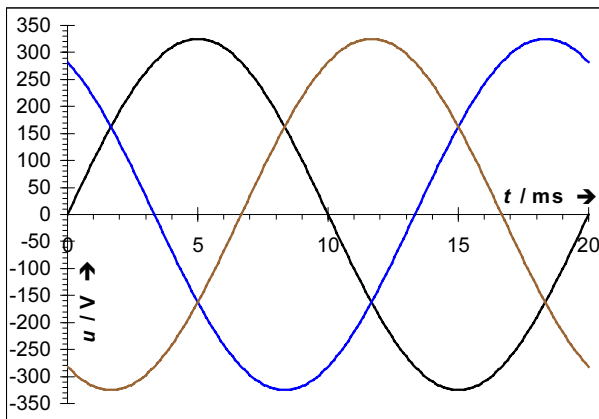
I GDZIE TU JEST „HARMONIA”?

Jachranka 2001 r.

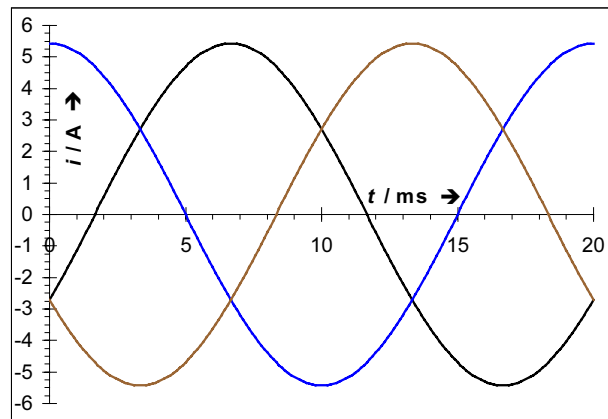
NADCHODZĄ WYŻSZE HARMONICZNE

Przyzwyczajenia użytkowników się zmieniły. Dotyczy to w jeszcze większej mierze użytkowników prądu niż nas, użytkowników ludzkiego rodzaju. A skutki? Korozja piorunochronów, uziemień fundamentowych, rur wodociągowych, rur gazowych i zbrojenia w betonie. Sieci komputerowe stają się ślimaczo powolne albo się zawieszają. Przewody neutralne stają się gorące, w krańcowym przypadku aż do spowodowania pożaru, mimo że każdy fachowiec elektryk wie, że wystarczy by rozłożył obciążenia jednofazowe równomiernie na wszystkie trzy fazy i już przez przewód neutralny prąd nie płynie. A może przypadkiem teraz już tak nie jest?

Robimy przy tym milcząco założenie, że chodzi tu o obciążenia liniowe, a więc omowe, indukcyjne, pojemnościowe i ich kombinacje, przy których przebiegi prądu są sinusoidalne. Dawniej nie było żadnych innych odbiorników. Wraz ze zwycięskim pochodem elektroniki sytuacja zasadniczo się zmieniła.



Rys.1 Praca świetlówki 58W z elektronicznym statecznikiem starszego typu



Rys.2 Zniekształcenie napięcia sieciowego przy pracy 20 takich stateczników elektronicznych w jednej fazie

Elektronika musi być zasilana prądem stałym, w dodatku bezprzerwowo. Prostowanie przez proste odwracanie jednej połówki napięcia sinusoidalnego wystarcza przy zasilaniu silnika prądu stałego, ale w żadnym przypadku przy zasilaniu układu elektronicznego. Przedział zbyt niskich wartości chwilowych w otoczeniu przejścia napięcia przemiennego przez zero jest z tego powodu buforowany kondensatorem, który z kolei jest ładowany tylko przez stosunkowo krótki czas w pobliżu szczytowej wartości napięcia (mały kąt przepływu prądu). Tylko w tym krótkim czasie płynie prąd z sieci, ale za to o znacznie większym natężeniu (rys.1).

Takie nieliniowe przebiegi prądu można traktować jak sumę nieskończonego szeregu sinusoidalnych wyższych harmonicznnych, których częstotliwości są całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości podstawowej. Noszą one ładnie brzmiącą, ale niestety mylącą nazwę „harmoniczne”. W rzeczywistości jednak mogą wprowadzić całkowitą dysharmonię w sieci.

ZŁE PRZYPADKI: PRĄD PRĄDOWI NIE RÓWNY

Wszystkie cyfrowe multimetry i mierniki tablicowe, jeśli nie są wyraźnie przeznaczone do pomiaru wartości skutecznych, wskazują tylko wartości średnie. Przy mierzeniu napięcia lub prądu przemiennego są wyskalowane przy użyciu stałego współczynnika kształtu $F_f=1,1107$ odpowiedniego dla przebiegów sinusoidalnych. Przy przebiegach różniących się od sinusoidy współczynniki kształtu nie są jednak stałe i w praktyce mają znacznie większe wartości.

Wyobraźmy sobie, że prąd o natężeniu $I=1A$ przepływa przez opornik o oporności $R=1\Omega$. Spadek napięcia na oporniku wynosi wtedy:

$$U = R * I = 1V,$$

a wydzielana moc:

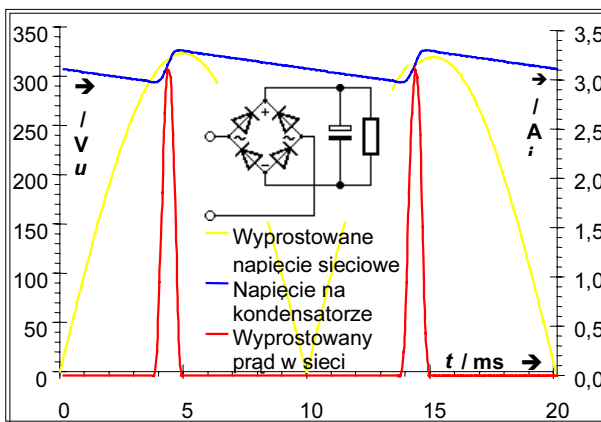
$$P = U * I = U^2 / R = 1V * 1A = (1V)^2 / 1\Omega = 1W.$$

Jeśli jest to prąd przemienny (o przebiegu prostokątnym) o częstotliwości 50Hz, to w ciągu jednego okresu przenoszony jest ładunek (rys.3)

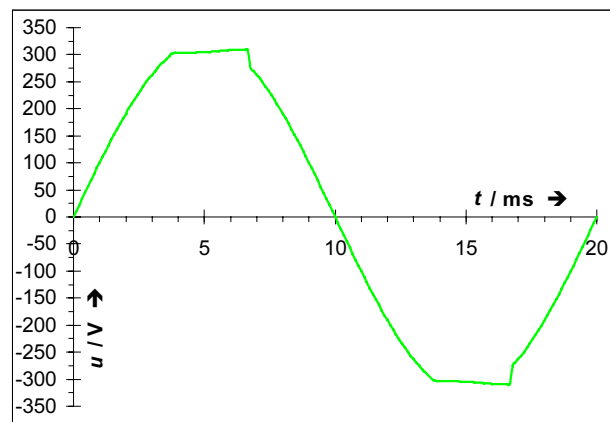
$$q = 2 * 10ms * 1A = 20mAs,$$

a w oporniku wydzielą się energia równa (rys.4)

$$W = 2 * 10ms * 1W = 20mWs.$$



Rys.3



Rys.4

Teraz przepuścimy przez ten sam opornik prąd o natężeniu $I = 2A$ lecz przerywany, o wypełnieniu 50% (nadal o przebiegu prostokątnym). W czasie przepływu prądu spadek napięcia wynosi:

$$U = R * I = 1\Omega * 2A = 2V,$$

a wydzielana moc odpowiednio:

$$P = U * I = U^2 / R = 2V * 2A = (2V)^2 / 1\Omega = 4W.$$

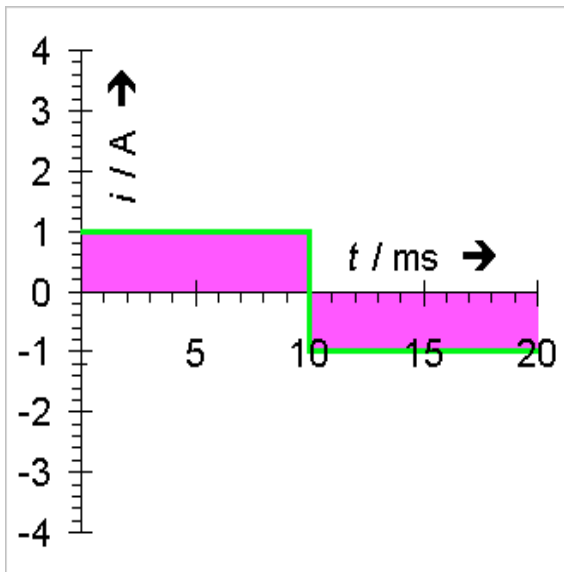
Ładunek przenoszony w czasie jednego okresu jest równy:

$$q = 2 * 5ms * 2A = 20mAs,$$

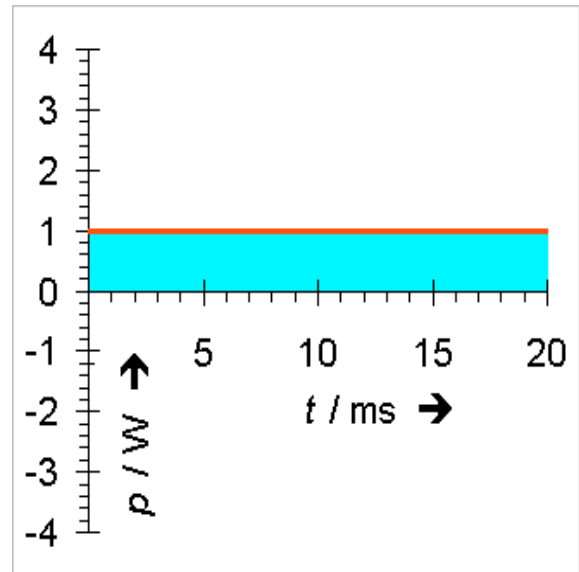
a więc tyle samo co poprzednio ale energia:

$$W = 2 * 5ms * 4W = 40mWs$$

jest dwukrotnie większa niż w poprzednim przykładzie (rys.6). Innymi słowy: wskutek zmienionego kształtu wartość średnia prądu pozostała taka sama (1A) jak poprzednio, tj. w obydwu przypadkach przez dowolne miejsce przewodu przepływa w obydwu przypadkach $6,25 * 10^{18}$ elektronów. Jednak przenoszona przez nie moc - uśredniana przez cały okres - zwiększyła się z 1W w pierwszym przypadku do 4W w drugim!



Rys.5



Rys.6

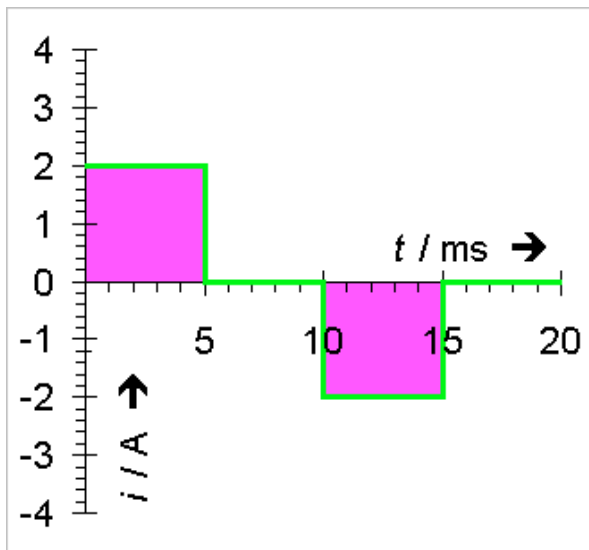
Jeśli mówilibyśmy np. o ładowaniu akumulatora albo o wytwarzaniu sił magnetycznych, to obydwie prądy rozważane w odniesieniu do pełnego okresu byłyby ekwiwalentne. Jednakże w przeciwieństwie do tego działanie cieplne, a więc straty mocy w kablach, przewodach i uzwojeniach, zwiększa się, ponieważ moc cieplna wzrasta wraz z kwadratem prądu. A więc na przykład moment obrotowy i prędkość silnika elektrycznego, zasilanego każdym z tych prądów, byłyby w obu przypadkach takie same. Tym samym także oddawana moc mechaniczna. Straty cieplne w uzwojeniach byłyby w drugim przypadku czterokrotnie większe niż w pierwszym!

- W przypadku miernika z ruchomym żelazem siła wychylająca wskazówkę jest proporcjonalna do kwadratu prądu, a więc wskazuje on przy przebiegach okresowych (o odpowiednio dużej częstotliwości) wartość skuteczną.
- W przypadku miernika z ruchomą cewką siła wychylająca wskazówkę jest proporcjonalna do prądu, a więc wskazuje on przy przebiegach okresowych (o odpowiednio dużej częstotliwości) arytmetyczną wartość średnią, zaś przy użyciu mostka prostowniczego wartość średnią przebiegu po wyprostowaniu.

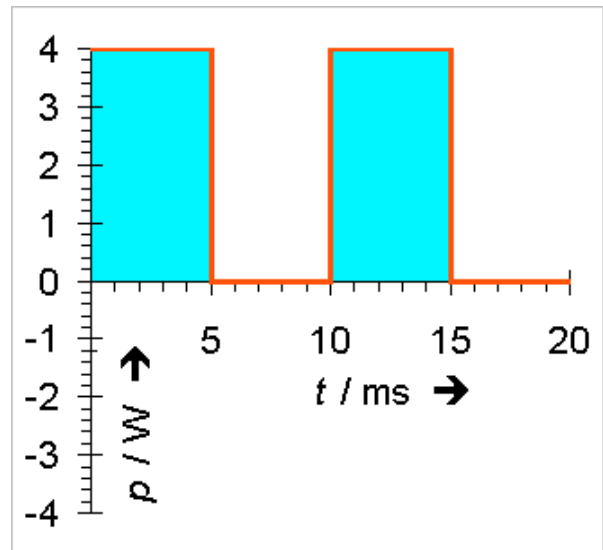
Miernik z ruchomym żelazem kosztuje wprawdzie nieco więcej niż miernik z ruchomą cewką, ale kto jeszcze używa przyrządów analogowych, kiedy już za 20 euro lub mniej można dostać multimetry cyfrowe? Jednakże przy miernikach cyfrowych uzyskanie dokładnego wskazania wartości skutecznej jest znacznie trudniejsze niż „zwykłe zliczanie przepływających elektronów”. Z tego powodu takie multimetry można znaleźć dopiero w klasie cenowej powyżej 180 euro. Ten twardy orzech musi zgryźć ten, kto chce mierzyć prądy i napięcia o nieznanym kształcie i w ten sposób określać obciążenie przewodu. Jeśli jednak chodzi o ładowanie wspomnianego akumulatora, *trzeba* wybrać przyrząd wskazujący wartość średnią! W przeciwnym razie może się zdarzyć, że ładujemy przez godzinę prądem 2A, a potem znajdujemy w akumulatorze zaledwie ładunek 1Ah.

ZNIEKSZTAŁCONE PRZEBIEGI

A więc jest jasne, że współczynnik kształtu (= stosunek wartości skutecznej do wartości średniej po wyprostowaniu) prądu rośnie w miarę wzrostu zniekształcenia kształtu krzywej. Często sądzi się, że np. zwyczajne stateczniki do świetlówek powodują zniekształcenia prądu, ale stwierdzenie w takiej postaci nie jest słuszne. Można by to było wyjaśnić pracą w strefie nasycenia magnetycznego, ale tego się przecież unika już przez odpowiednie zaprojektowanie. To już raczej sama świetlówka jest odbiornikiem w dużym stopniu nieliniowym, ze względu na zasadę działania jako gazowana lampa wyładowcza (rys.7).



Rys.7 Charakterystyka świetlówki 230V 58W, uzyskana przez pomiar prądem stałym i obliczona wg wzoru empirycznego



Rys.8 Charakterystyka świetlówki 230V 58W, uzyskana przez pomiar prądem stałym i obliczona wg wzoru empirycznego

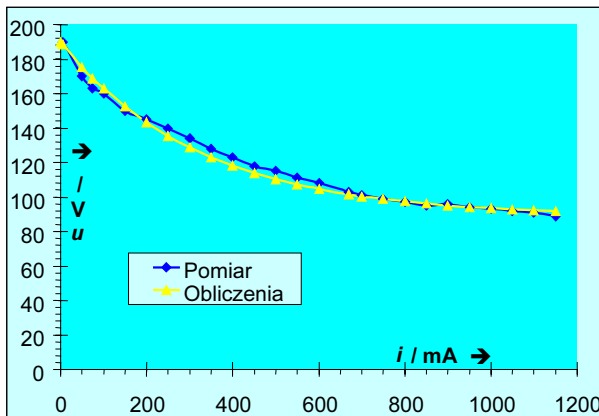
I właśnie przeciwnie, indukcyjność statecznika wpływa na to, że bardzo silne zniekształcenie napięcia tylko trochę odbija się na kształcie prądu. Przebieg prądu niewiele odbiega od idealnego kształtu sinusoidalnego (rys.8, linia czerwona).

Z drugiej strony, ostre jak szpilki impulsy o 2,5 razy wyższych amplitudach, wprowadzane do sieci przez pozbawiony filtru statecznik starszego typu, zadają jej mocny cios. Wprawdzie technika ta spotykana jest dziś jeszcze tylko przy świetlówkach kompaktowych w zakresie do 25W, ale przy innych obciążeniach (np. w zwykłych zasilaczach taktowanych do komputerów) jest jeszcze ciągle standardem. A to ma konsekwencje, nie tylko dla metod pomiarowych, ale także dla samej sieci 3-fazowej. Prawie nic nie zmienia tu nawet wprowadzenie w styczniu 2000r. normy EN 61000-3-2.

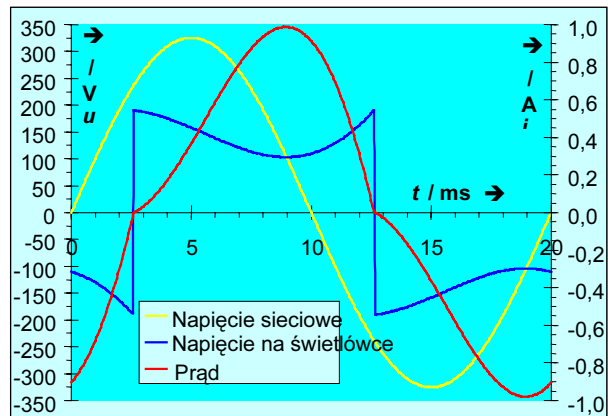
NIEUDANA KOMPENSACJA

Jeśli narysujemy prądy w trzech fazach i dodamy ich wartości chwilowe, jak na rys.9 i na rys.10, otrzymamy nieliniową pozostałość, która – głównie jako „trzecia harmoniczna” o częstotliwości 150Hz – płynie przez przewód neutralny.

W przypadku stosowania stateczników konwencjonalnych wartość tego prądu jest ograniczona do około 35% prądu fazowego, dzięki filtrującemu działaniu dławików (rys.9). Stosunkowo duża składowa mocy bierniej harmonicznej podstawowej daje się bez trudności skompensować za pomocą kondensatorów (rys.10).

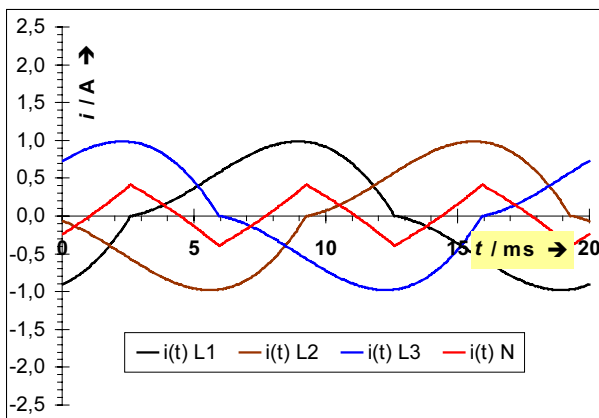


Rys.9 Przebiegi prądu przy pracy 3 świetlówek z klasycznymi statecznikami, zasilanych z 3 faz systemu trójfazowego

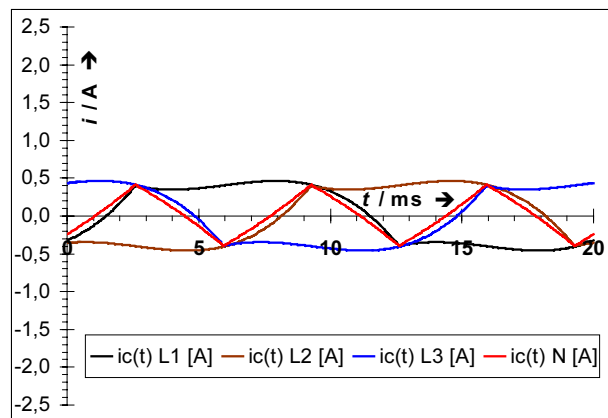


Rys.10 Przebiegi prądu przy pracy 3 świetlówek z klasycznymi statecznikami, zasilanych z 3 faz systemu trójfazowego

Te same trzy świetłówki, ale wyposażone w stateczniki elektroniczne starszego typu, dają obraz, na którym przebiegi czasowe prądów fazowych się nie krzyżują (rys.11).



Rys.11 Prądy wejściowe przy pracy 3 świetlówek ze statecznikami elektronicznymi, zasilanych z 3 faz systemu trójfazowego



Rys.12 Prąd w przewodzie neutralnym przy trójfazowym zasilaniu 3 świetlówek ze statecznikami elektronicznymi

Wynik: przebieg sumaryczny wygląda tak samo, jak trzy nałożone na siebie przebiegi składowe (rys.12)! Kompensacja nie występuje. Wartość średnia po wyprostowaniu prądu w przewodzie neutralnym jest trzykrotnie większa niż każdego z prądów fazowych, zaś wartość skuteczna ciągle jeszcze $\sqrt{3}$ razy większa. I w tym stanie rzeczy przepisy VDE 0100 ciągle jeszcze dopuszczają stosowanie zmniejszonego przekroju przewodów powrotnych. Jak to powiedział pewien cynik: ostatecznie przewód powrotny nie jest zabezpieczony, więc wyłączenie nie może nastąpić.

W tym miejscu warto zwrócić uwagę na to, że pojęcie „kompensacja” nie reprezentuje w elektrotechnice całkowicie jednoznacznej treści. Przede wszystkim omawiana dotąd kompensacja w przewodzie neutralnym prądów powrotnych poszczególnych faz nie ma nic wspólnego z ogólnie znaną kompensacją mocy biernej (ale później okaże się, że jednak ma. Powiemy o tym więcej dalej). Rozważmy najpierw od dawna stosowaną kompensację biernej składowej obciążeń omowo-indukcyjnych przez dołączanie wybieranych, najczęściej w sposób stopniowany, obciążeń czysto pojemnościowych. Przymknijmy oko na to, że niejedna z instalacji kompensacyjnych nie ma żadnej regulacji, jest nastawiona na stałe, więc o dopasowaniu przy rozbudowie kompensowanej sieci można zapomnieć. Przy instalacjach wyposażonych w regulację pomiar odbywa się tylko w jednym przewodzie fazowym i zakłada się, że przecież obciążenie jest symetryczne. Niech to w zasadzie będzie prawda, choć nikt tego nie gwarantuje, ale czy naprawdę musi tak być, że regulacja, czyli dopasowanie do aktualnego przepływu mocy biernej odbywa się w sposób stopniowany przy użyciu styczników? Zależnie od wartości chwilowej, w momentach odłączania i następnie ponownego dołączania grupy kondensatorów może tu wystąpić przepięcie dochodzące do podwójnej wartości amplitudy napięcia roboczego. Wywołuje ono odpowiednie prądy wyrównawcze, których wartość szczytowa odpowiada podwójnemu udarowemu prądowi zwarcia instalacji! Występuje to szczególnie przy automatycznym wyzwalaniu krótkich przerw w celu wygaszania wyładowań łukowych w zasilającej sieci wysokiego napięcia. Zatem mówimy tu o milisekundach. Obecność oporników rozładowczych zupełnie nic tu nie pomaga. Jakie to ma następstwa dla trwałości zestyków styczników a także dla kondensatorów, może sobie wyobrazić każdy obeznany z elektrotechniką. Dodajmy tu jeszcze występowanie skoków napięcia w sieci i zakłócenia indukowane w przebiegających w pobliżu przewodach do transmisji danych.

Oczywiście, dzisiaj tak być nie musi. Istnieją regulatory mocy biernej sterowane przy użyciu tyrystorów, które zadanie to spełniają miękko, bezstopniowo i w dodatku znacznie szybciej. Te jednak powodują zniekształcenia prądu, którymi – co później pokażemy - trzeba się zająć. Chyba, że tyrystory nie służą do sterowania fazowego, lecz tylko do przełączania przy odpowiednio korzystnej fazie. To już dużo daje, ale dlaczego by nie dołączać baterii kondensatorów za pośrednictwem transformatora o regulowanej przekładni? Kto teraz wspomni o „górach miedzi” w sensie negatywnym albo o zbyt wysokich kosztach, niechże sobie policzy, ile styczników (z odpowiednią liczbą roboczogodzin i czasem przestoju urządzeń) przeżyje jeden taki transformator.

Do tłumienia takich impulsów prądowych instaluje się chętnie kondensatory połączone z dławikami, a więc szeregowe człony LC. Troskliwie unika się przy tym dokładnej zgodności częstotliwości rezonansowej takiego członu LC z całkowitą wielokrotnością częstotliwości sieciowej, ponieważ wtedy właśnie nie byłby to dobry „odsysacz” wyższych harmonicznych. Całkiem przeciwnie członów LC używa się coraz częściej również i przede wszystkim aby trzymać wyższe harmoniczne zdala od kondensatora. Kondensator jest dla wyższych częstotliwości bardziej przepuszczalny i dlatego w znacznym stopniu pozwalałby na przepływ istniejących wyższych harmonicznych, czyli by je „kompensował”. Ostatecznie wyższe harmoniczne to nic innego jak inna forma mocy biernej albo jeden ze składników całkowitej mocy biernej. I tu ponownie spotykają się obydwie pojęcia „kompensacji”: gdyby wszystkie nieliniowe składniki prądu biernego zostały skompensowane przez obwody absorbujące, nie pozostałoby nic co, mimo symetrycznego rozkładu obciążeń, nie kompensowałoby się przez sumowanie w przewodzie neutralnym.

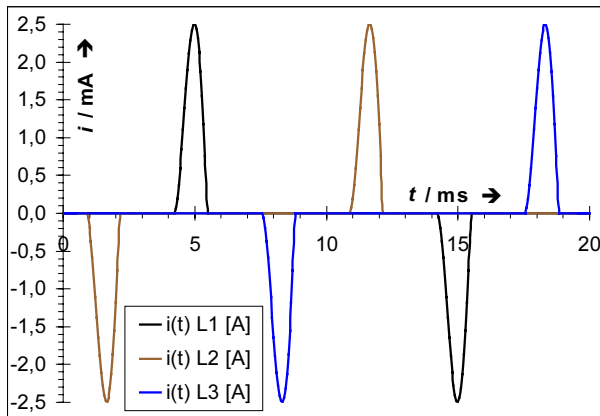
Prądy odkształcone uniemożliwiają obliczenie prądowego obciążenia kondensatorów i dlatego są tu niepożądane; stąd obecność dławików: typowe urządzenia kompensacyjne są obliczone *tylko* na moc bierną składowej podstawowej i celowo pomijają wyższe harmoniczne. Pewna liczba połączonych równolegle szeregowych członów LC, nastrojonych na częstotliwości najczęściej występujących harmonicznych, miałyby dla odnośnych częstotliwości prawie zerową impedancję (praktycznie tylko omową oporność uzwojeń) i byłaby optymalnym urządzeniem kompensacyjnym dla wyższych harmonicznych [2]. Jednak w praktyce ta metoda zupełnie nie jest stosowana. Dlaczego nie?

Pewien renomowany producent urządzeń kompensacyjnych próbował tego w rozgłośni *Westdeutsche Rundfunk* w Kolonii. Na wszystkich przewodach mikrofonowych występował tam przydźwięk powodowany przez rosnące stosowanie zasilaczy impulsowych i innych urządzeń prostownikowych w połączeniu z niewłaściwym zasilaniem w systemie TN-C - typowy przypadek opisywanych zakłóceń. Rozwiązanie idealne pod względem technicznym - kompensacja i filtrowanie w każdym punkcie powstawania zakłóceń albo przynajmniej grupowo - było zbyt drogie. Określono całkowitą emisję wyższych harmonicznnych na około 10A i - biorąc pod uwagę potrzeby rezerwowe - zainstalowano w rozdzielni centralnej kompensację typu „odsysanie” zwymiarowaną na 20A. Przy uruchamianiu urządzenia pomierzono prąd odkształceń i ze zdziwieniem stwierdzono wartość 50A. Zaskakujące? Nie: obwody odsysające robią to do czego są przeznaczone. Nie mogą one jednak odróżnić wyższej harmonicznnej pochodzącej z instalacji leżącej wewnątrz budynku od wyższej harmonicznnej tego samego rzędu pochodzącej z zewnętrznej sieci zasilającej. Jeśli w tej sieci zewnętrznej występują obce częstotliwości i znajdują w sieci zasilanej drogę prawie bez impedancji (prawie zwarcie) to oczywiście tą drogą popłyną. Własne urządzenie kompensacyjne musiałyby być bardzo silnie przewymiarowane, ale nikt nie wie z góry *jak* bardzo. A że nikt nie może sobie pozwolić - całkiem pomijając odczuwane przy tym przykrości - na finansowanie sprzętania także przed drzwiami licznych sąsiadów, ten optymalny sposób postępowania ze stacjonarnymi zakłóceniami niskiej częstotliwości w sieci zasilającej, najczęściej nie znajduje zastosowania.

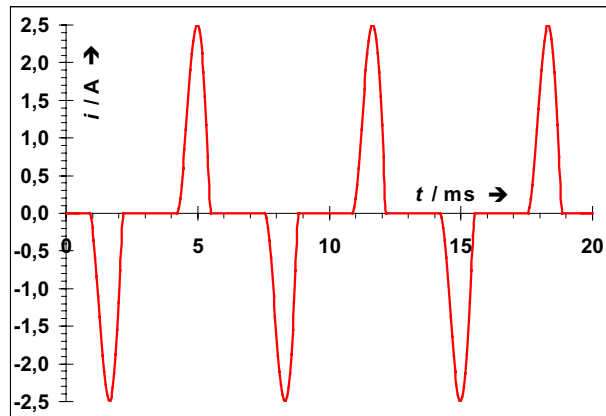
IMPULSY

Każdy wykształcony w elektrotechnice człowiek pomyśli sobie, że w takich sytuacjach prądy przy załączaniu muszą być niebotycznie duże, ale jak bardzo duże?

Na rys.13 przedstawiono to graficznie również dla dwóch przypadków. Prądy przy załączaniu osiągają nawet w najbardziej korzystnym przypadku - przy załączaniu w chwili przejścia napięcia przez zero - wartości szczytowe odpowiadające 200-krotnej wartości prądu nominalnego (przy założeniu braku mocy biernej). W najbardziej niekorzystnym przypadku - przy załączaniu przy szczytowej wartości napięcia - niewiele brakuje do 1000-krotnej wartości (zamiast $\sqrt{2}$ -krotnej przy obciążeniach omowych). Tyle się zakłada dla każdego łącznika sieciowego. Może to mieć groźne skutki dla innych odbiorników elektronicznych w najbliższym otoczeniu.



Rys.13 Przebiegi przy załączeniu opisywanego statecznika elektronicznego



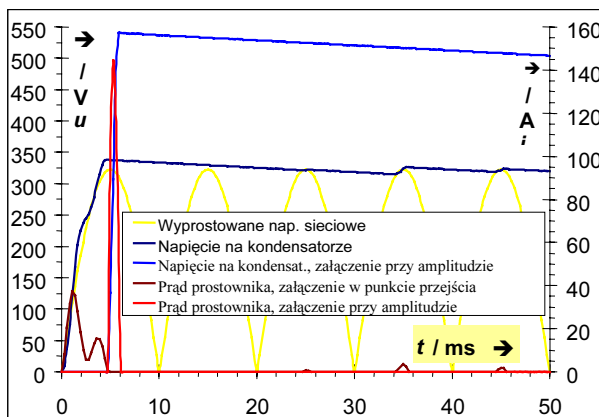
Rys.14 Zjawiska rezonansowe przy zmniejszonym kondensatorze wygładzającym

Próbuje się dziś przy świetłówkach kompaktowych opanować ten problem, a przy okazji obniżyć zawartość wyższych harmonicznych (i cenę sprzedaży z 5,00 euro na 4,98 euro) do znośnego poziomu, zmniejszając pojemność kondensatora wygładzającego. Wskutek tego traci się naturalnie częściowo jedną z zalet, pracę bez migotania. Poza tym może dojść do oscylacji pomiędzy pojemnością tego kondensatora i indukcyjnością sieci. Na rys.14 zachowano parametry sieci, ale zmniejszono pojemność kondensatora wygładzającego z 220 μ F na 22 μ F.

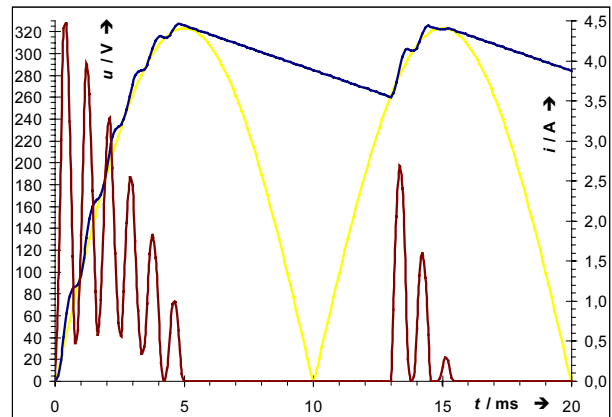
W zasilaczach komputerów osobistych byłoby to rozwiązanie tak czy inaczej pozbawione sensu. Tu w celu ograniczenia prądu włączenia stosuje się po stronie sieci termistory NTC, przy czym mają one wartości nie większe niż 2,2 Ω w stanie zimnym, aby w stanie gorącym nie były one zbyt duże i aby w ten sposób ograniczyć stałe straty i dodatkowe wydzielanie ciepła. W tej sytuacji są jednak jeszcze teoretycznie możliwe prądy przy załączeniu do 140A. Mogą być nawet większe, jeśli krótko przed włączeniem komputer pracował i termistor jest jeszcze ciepły. Droższe „porządne” rozwiązanie polega na użyciu odpowiednio zwymiarowanego opornika zwieranego przez przełącznik albo triak. Wytwórcy nie wbudowują jednak takich układów, ponieważ klientom brak wiedzy w tym zakresie i nie zaakceptowałyby podwyższonej ceny. Nie stosuje się także filtrów pasywnych ani aktywnych, które za jednym zamachem mogłyby usunąć problemy prądów załączania oraz periodycznych zniekształceń prądu. To co przy większych statecznikach elektronicznych stało się aktualnym stanem techniki (bo inaczej już nie było można), w komputerach będzie pewnie stosowane dopiero gdy sytuacja będzie już bardzo zła. Istnieją także jeszcze inne metody poprawiania kształtu prądu.

JESZCZE JEDEN ŚMIECIARZ W SIECI: STARY, DOBRY ŚCIEMNIACZ

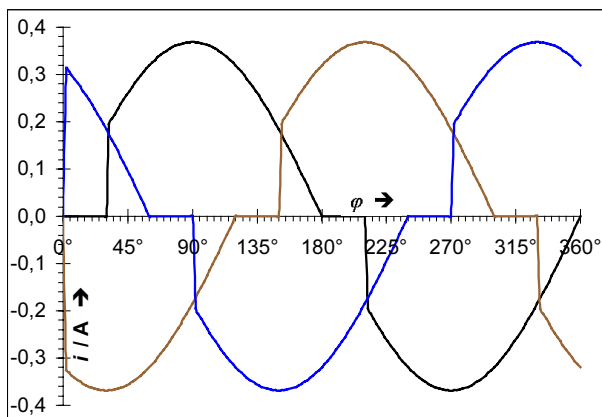
Zajmijmy się szeroko rozpowszechnionym sposobem sterowania jasnością świecenia lamp żarowych, poprzez sterowanie fazowe. Lampy żarowe są obciążeniem czysto omowym, więc liniowym, i przy symetrycznym rozłożeniu na wszystkie trzy fazy przewód neutralny nie przewodzi prądu. Przy sterowaniu przy pomocy ściemniaczy powstają jednak zupełnie inne warunki. Pobór mocy każdej żarówki maleje, maleje także obciążenie każdego przewodu fazowego, chociaż zupełnie nie w takim samym stopniu. W przewodzie neutralnym pojawia się obciążenie, którego nie można zignorować! Na rys.15 naniesiono prądy 3 żarówek 60W rozłożonych na trzy fazy, sterowanych przez ściemniacze przy jednakowych punktach włączenia ustawionych na 30° . Odcięta część przebiegu jest jeszcze stosunkowo niewielka i pierwotny kształt sinusoidy jeszcze dobrze widoczny. Na rys.16 przedstawiono prąd pojawiający się w przewodzie neutralnym, złożony z trzech prądów fazowych. Jest to jeszcze prąd przerywany. Wyraźnie widać, że najniższa częstotliwość jaka tu występuje wynosi 150Hz.



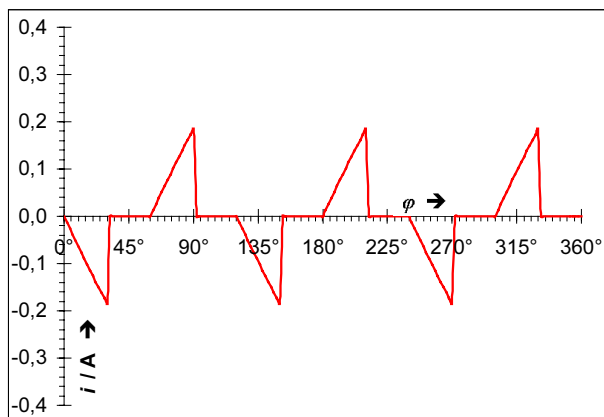
Rys.15 Prądy fazowe trzech żarówek 60W zasilanych trójfazowo przez ściemniacze nastawione na 30°



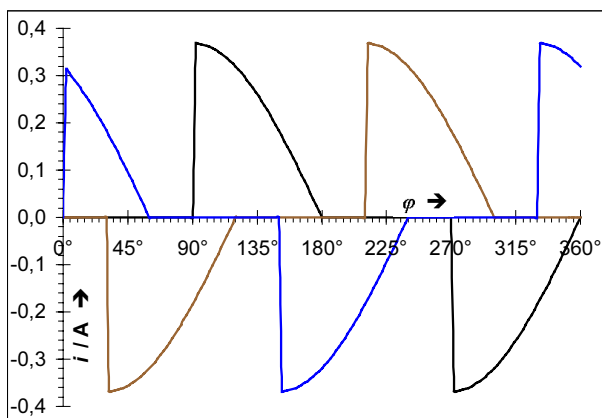
Rys.16 Obciążenie przewodu N przy pracy j. na rys.15



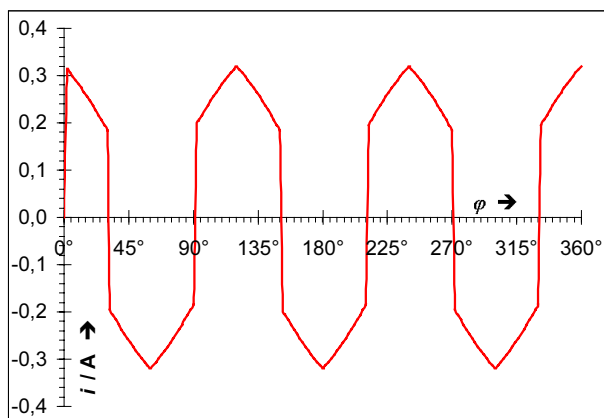
Rys.17 Prądy fazowe trzech żarówek 60W zasilanych trójfazowo przez ściemniacze nastawione na 90°



Rys.18 Obciążenie przewodu N przy pracy j. na rys.17



Rys.19 Prądy fazowe trzech żarówek 60W zasilanych trójfazowo przez ściemniacze nastawione na 45°, 90° i 135°



Rys.20 Obciążenie przewodu N przy pracy j. na rys.19

Na rys.17 i 18 wszystkie trzy kąty załączania zwiększono do 90°. W ten sposób z początkowej powierzchni (napięcie razy czas) ograniczonej sinusoidą wycięto dokładnie połowę. Ze względu na omowy charakter obciążenia, podobnie zachowuje się powierzchnia pod krzywą prądu. Inaczej zmieniają się wartości skuteczne. Tu redukcja jest nieco większa. Spójrzmy na prąd w przewodzie neutralnym: nie jest to już prąd przerywany, ale 3 harmoniczna jako element podstawowy jest nadal wyraźnie widoczna.

Oczywiście w normalnej sieci znajduje się wiele ściemniaczy rozmieszczonych przypadkowo i różnie nastawionych. Jeśli pozostawimy układ jak na rys.17 i 18, ale przestawimy pierwszy ściemniacz na 45° a trzeci na 135° , otrzymamy przebiegi przedstawione na rys.19 i rys.20. Teraz jest wyraźnie widoczne, że przewód neutralny niezależnie od wszystkich wyższych harmonicznych został obciążony składową 50Hz. W liczbach sytuacja przedstawia się następująco:

	L1	L2	L3		
ϕ	90°	90°	90°		
U_{AV}	101,7	101,7	101,7	V	
U_{Eff}	161,3	161,3	161,3	V	
	L1	L2	L3	N	
i_{AV}	0,115	0,115	0,115	0,258	A
i_{Eff}	0,183	0,183	0,183	0,261	A
i_{Eff} / i_{AV}	1,585	1,585	1,585	1,014	
\hat{i} / i_{Eff}	2,016	2,016	2,016	1,221	

Tabela 1: Wartości liczbowe przy 3 jednakowych kątach wysterowania

	L1	L2	L3		
ϕ	45°	90°	135°		
U_{AV}	176,7	101,7	30,3	V	
U_{Eff}	219,9	161,3	69,5	V	
	L1	L2	L3	N	
i_{AV}	0,200	0,115	0,034	0,155	A
i_{Eff}	0,249	0,183	0,079	0,188	A
i_{Eff} / i_{AV}	1,244	1,585	2,293	1,213	
\hat{i} / i_{Eff}	1,479	2,016	3,251	1,702	

Tabela 2: Wartości liczbowe przy 3 różnych kątach wysterowania

W zasadzie w Tabeli 1 w porównaniu z Tabelą 2 wycięto z napięcia i prądu w fazie L1 dokładnie o tyle samo mniej, o ile w fazie L3 wycięto więcej. Jednak „reszta“ wynikająca z sumowania w przewodzie neutralnym nie jest w obydwu przypadkach taka sama. Inny jest przebieg przedstawiony graficznie, inna wartość średnia, a już zupełnie inna wartość skuteczna. Wartości średnia i skuteczna prądu w przewodzie neutralnym różnią się przy symetrycznym wysterowaniu ściemniaczy bardzo nieznacznie, mniej niż przy czystych przebiegach sinusoidalnych, za to przy wysterowaniu niesymetrycznym bardziej. Jednakże stwierdzamy z zaskoczeniem, że całkowite obciążenie przewodu neutralnego, wyrażone przez wartość skuteczną, przy wysterowaniu niesymetrycznym, więc ze składową 50Hz, jest mniejsze niż bez tej składowej.

A więc nie można postawić znaku równości pomiędzy dodawaniem przebiegów punkt po punkcie i dodawaniem wartości zmierzonych. Możemy tu pominąć przedstawienie zależności matematycznych, ale projektanci i instalatorzy muszą sobie wyrobić poczucie, że „to wszystko nie jest takie proste“ i że wraz z nowymi rodzajami odbiorników pojawiają się w sieci zupełnie nowe rodzaje obciążeń.

KONSEKWENCJA: WIELKIE PORZĄDKI W SIECI

Wykresy dla standardowych świetlówek 58W ze statecznikami elektronicznymi na rys.1, rys.11 i rys.12 oraz obliczenia dla żarówek sterowanych przez ściemniacze oparto na następujących danych:

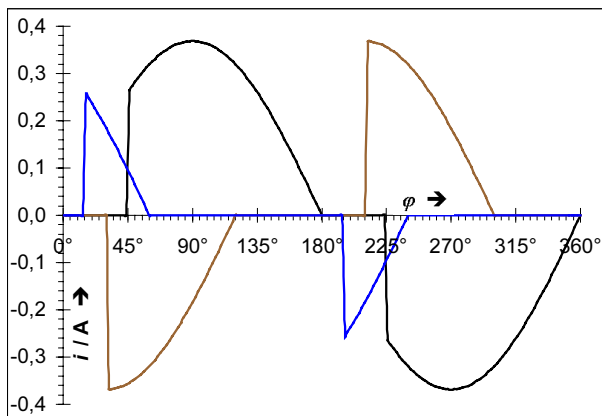
- napięcie sieci: 230V, 50Hz
- oporność sieci: $0,500\Omega$
- indukcyjność szeregową sieci: 0,904mH
- odpowiednia impedancja sieci: $0,575\Omega$

dotatkowo w przypadku stateczników elektronicznych z prostowaniem i wygładzaniem na wejściu:

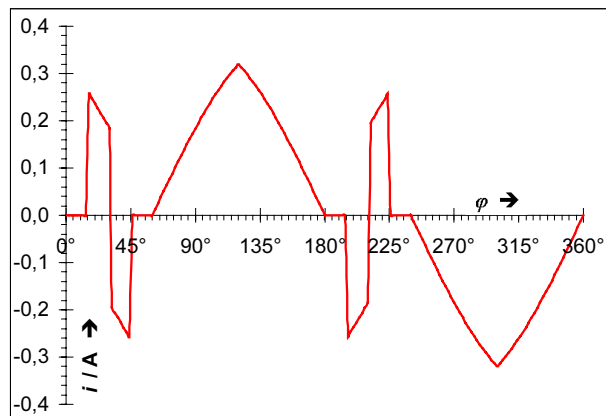
- obciążenie stałoprądowe: $58W/(230V * \sqrt{2}) \approx 180mA$
- pojemność kondensatora wygładzającego w stateczniku: $220\mu F$.

Tylko 20 takich świetlówek, ze statecznikami elektronicznymi opisanego typu, wystarczy by przy podanych parametrach sieci znacząco zniekształcić napięcie (rys.2). Trochę poprawia nastrój fakt, że przy większych statecznikach elektronicznych takich rozwiązań się już nie stosuje. Ale postawmy na miejscu tych przykładowych 20 stateczników np. 10 komputerów PC z monitorami, 25 odbiorników telewizyjnych albo 50 świetlówek oszczędnościowych i już mamy takie same warunki.

Wszystkie przytoczone dotąd stwierdzenia zostały wyprowadzone na podstawie wyżej przyjętych wartości oraz według empirycznych zależności opisujących zachowanie się świetlówek przy prądzie stałym. Jednak w żadnym razie nie jest to tylko problem występujący w teorii. W dużym budynku mieszczącym magazyn, dział wysyłkowy i administrację stwierdzono przy użyciu przyrządów wysokiej jakości przebiegi pokazane na rys.21 i rys.22.



Rys.21



Rys.22

Wprowadzanie nowoczesnej techniki pozwala oszczędzać energię, ale do przesyłania tej samej mocy potrzebna jest teraz znacznie większa skuteczna wartość prądu. A więc co robić? Zrezygnować z nowoczesnej elektroniki? W żadnym razie. Ale trzeba budować sieci, które poradzą sobie z takimi obciążeniami. Nawet mimo tego, że właściwe normy i przepisy dopiero są dopasowywane do nowych warunków i korzystanie ze starych norm jest jeszcze możliwe.

A zatem:

- Nie stosować żadnych przewodów ani kabli o zmniejszonym przekroju przewodu neutralnego albo ochronnego! Miejmy na uwadze prądy wyrównawcze, które zależnie od sytuacji mogą płynąć pomiędzy poszczególnymi odbiornikami, nie dochodząc do najbliższej rozdzielni.

- Stosować wyłącznie okablowanie 5-przewodowe, nie instalować już sieci TN-C ani TN-C-S! Przewody N i PE powinny być połączone ze sobą tylko *jeden raz* na stacji transformatorowej, a dalej już nie. Jeżeli mamy kilka transformatorów, ich punkty neutralne (połączenie w gwiazdę) należy połączyć między sobą, ale tylko *w jednym miejscu* z ziemią i przewodem PE! W przeciwnym razie prądy przewodu neutralnego przepływają wzdłuż i wszerz przez system uziemień i wszystkie przewodzące elementy budynku połączone przez system wyrównania potencjałów. Mogą one tam powodować korozję i płyną częściowo przez system połączeń z masą - czyli ekrany przewodów urządzeń do przetwarzania danych - powodując tam występowanie spadków napięcia. Wskutek tego połączenia z masą nie mogą już spełniać swej roli tzn. nie zapewniają jednakowego potencjału na odbiorach końcowych. W ekstremalnych przypadkach obserwowano nawet tak duże obciążenia prądowe ekranów na przewodach do przesyłania danych, że przewody te stawały w dosłownym znaczeniu „gorącymi liniami“.
- Przekroje przewodów wybierać z nadmiarem! Zmniejsza to spadki napięcia a tym samym wpływ prądów odkształconych na napięcie - i jednocześnie straty energii. Przy tym tworzy się rezerwy na przyszłość. W USA gdzie, ze względu na napięcie znamionowe tylko 120V i odpowiednio większe prądy, problem jest jeszcze bardziej jaskrawy, używa się już częściowo kabli 6-żyłowych, przy czym dla przewodu neutralnego prowadzi się dwie żyły równoległe.
- Przy przyrządach pomiarowych i wyświetlaczach zwracać uwagę na mierzenie prawdziwej wartości skutecznej (TRMS)! Powinna uwzględniać także składowe prądu stałego.
- W przypadkach wątpliwych należy dawać pierwszeństwo zabezpieczeniom różnicowym czułym także na składowe stałoprądowe przed zabezpieczeniami FI na bazie magnetycznej. Jeszcze lepszy jest RCM (*Residual Current Monitoring*), czyli nadzorowanie prądu upływności. W tym przypadku przy wystąpieniu określonej różnicy prądu pomiędzy L1, L2, L3 i N wysyłany jest sygnał ostrzegawczy, a dopiero przy znacznie wyższej wartości następuje wyłączenie. Dzięki temu można uniknąć przy stopniowo narastających usterkach zaskakującego wyłączenia typowego dla ochrony FI.

Ponadto chcielibyśmy przytoczyć co powiedział neutralny specjalista p. Karl-Heinz Otto, zaprzysiężony biegły i rzeczoznawca w zakresie urządzeń niskiego napięcia, zasilających i elektronicznego przetwarzania danych [4], który w swoich ulubionych wykładach ciągle podkreśla, że: „Naszym zadaniem nie jest wypełnianie nakazów norm, lecz usuwanie zakłóceń i ochrona przed wystąpieniem szkód!” i dalej: „Kilka kilogramów miedzi więcej w instalacji budynku, to dobrze ulokowane pieniądze!”.

Podkreśla on zawsze z uznaniem zaangażowanie DKI na tym polu. Chętnie – i bardzo celnie – przyrównuje obieg prądu do obiegu wody. W instalacjach elektrycznych, również w nowych budynkach, tworzy się w praktyce ciągle sytuację podobną do przeciążenia systemu kanalizacyjnego w technice sanitarnej. Prąd jest prawidłowo doprowadzany przez jeden lub więcej przewodów fazowych do punktu odbioru, lecz nie znajduje określonej drogi powrotnej. Zamiast tego pozwala się prądom powrotnym „wsiąkać” w budynku, a cierpią na tym urządzenia elektroniczne. Tam gdzie drogi dopływu i powrotu prądu przemiennego nie są prowadzone koło siebie, można już z pewną słuszością mówić i elektrotechnicznym ścieku, który cuchnie aż pod niebo. Przy niekontrolowanej odległości między przewodami ich pola magnetyczne nie znoszą się i przestrzeń pomiędzy nimi przesycona jest zmiennymi polami magnetycznymi. Za odchyłanie promienia w lampach ekranowych także odpowiadają pola magnetyczne, nic więc dziwnego, że nawet małe natężenia pola zewnętrznego doprowadzają do migotania monitorów.

Na zakończenie podkreślmy jeszcze raz, że niniejsze wypowiedzi nie powinny być zrozumiane jako argument przeciwko błogosławieństwom nowoczesnej elektroniki. Przeciwnie, to sieci zasilające powinny być budowane tak, żeby mogły poradzić sobie z nowymi rodzajami obciążeń, które niesie ze sobą postęp techniczny. Z drugiej strony, tam gdzie jest to możliwe, powinien postęp techniczny eliminować te zagrożenia i skutki uboczne, już po stronie odbiornika. Na przykład od pewnego czasu wprowadzane są do handlu jedynie takie stateczniki elektroniczne, które formują swój prąd wejściowy w kształcie jakby pociętej sinusoidy i pracują niemal bez poboru mocy biernej i bez zniekształceń (podobnie do wspomnianych „filtrów aktywnych”).

Ta technika ma jednak znaczną cenę. Zbyt łatwo zapomina się przy tym, że istnieją np. szczególnie niskostratne stateczniki klasyczne, tzw. stateczniki usprawnione, które zapewniają niemal równy elektronicznym zysk na sprawności, zachowując odporność i prostotę stateczników klasycznych. Kosztują też zaledwie ułamek ceny stateczników elektronicznych. Postęp może w wyjątkowych przypadkach polegać także na powrocie do dawnych rozwiązań, odpowiednio usprawnionych. Drogie filtry aktywne często nie zapewniają tego czego się po nich spodziewamy, zaś odpowiednio dopasowane, wytrzymałe filtry pasywne o długiej żywotności są najczęściej wystarczające [5].

Mogliśmy jedynie zasygnalizować tu najważniejsze aspekty tej złożonej dziedziny. Bardziej wyczerpujące potraktowanie tematu wymaga już rozmiarów książki [6].

BIBLIOGRAFIA.

- 1) Faßbinder St.: „EN 61000-3-2 i praktyka”, etz 20/2000, str.12.
- 2) Faßbinder St.: „Vor der eigenen Tür gefegt (Sprzątanie przed własnymi drzwiami)”, de 9-20/1999. Dostępne w DKI Düsseldorf jako druk specjalny nr zam. s185 „Wechselwirkungen von Blindstrom-Kompensationsanlagen mit Oberschwingungen (Oddziaływanie urządzeń do kompensacji prądu biernego na wyższe harmoniczne)”.
- 3) Reutlinger K.M.: „Elektronische Einzelantriebsysteme für Textilmaschinen (Elektroniczne napędy indywidualne dla maszyn tekstylnych)”, etz 19/1997, str.6.
- 4) <http://www.sv-otto.de>
- 5) Clewing M.: „Statische USV im Leistungsbereich unter 6 kVA (stacyjne UPS w zakresie mocy poniżej 6 kVA)”, etz 3-4/2000, str.26.
- 6) Faßbinder St.: „Netzstörungen durch passive und aktive Bauelemente (Zakłócenia w sieci wprowadzane przez elementy bierne i aktywne)”, VDE Verlag, Offenbach, jesień 2001.

M I E D Ź
M A ą D R Y
W Y B Ó R



Polskie Centrum Promocji Miedzi S.A.
50-136 Wrocław, Pl. 1 Maja 1-2