

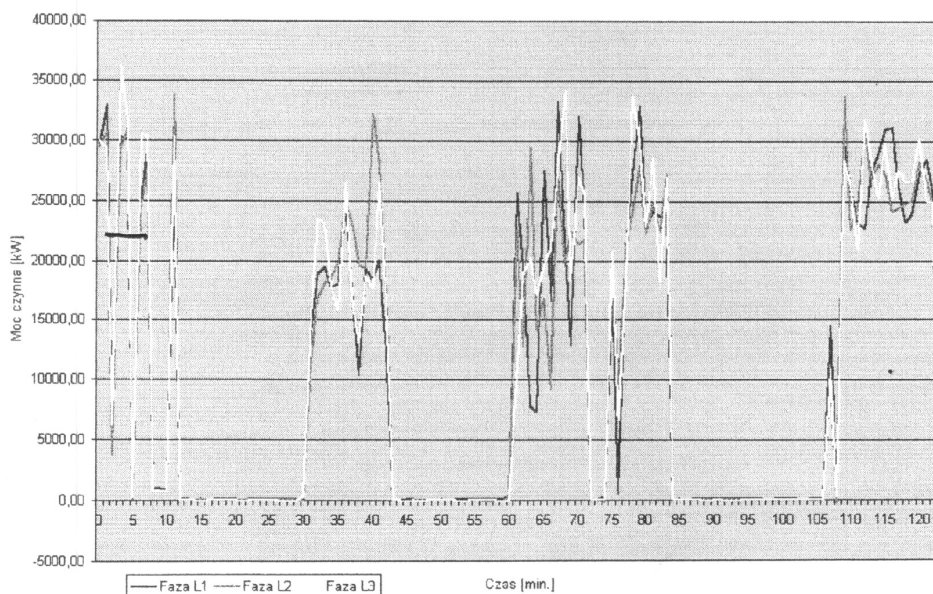
dr inż. Krzysztof Matyjasek
ELMA energia Olsztyn

Pasywne filtry drugiego rzędu typu „C” Kompensacja mocy biernej pieców łukowych

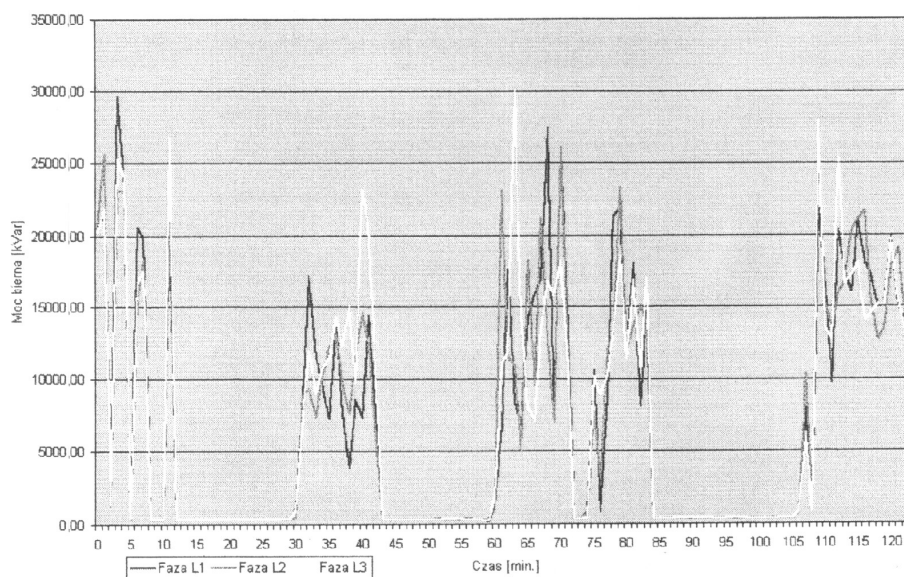
Piece łukowe stanowią najbardziej „niespokojne” odbiory elektroenergetyczne, które charakteryzują się:

- dużymi mocami znamionowymi,
- gwałtownymi zmianami poboru mocy czynnej i biernej,
- związanymi z powyższymi gwałtownymi zmianami napięcia na szynach średnich napięć,
- stosunkowo niską wartością współczynnika mocy,
- generowaniem wyższych harmonicznych prądu (spektrum obejmuje wszystkie harmoniczne od 2-giej do 50-tej, przy czym dominującymi są harmoniczne 2-ga i 3-cia),
- występowaniem flikeringu.

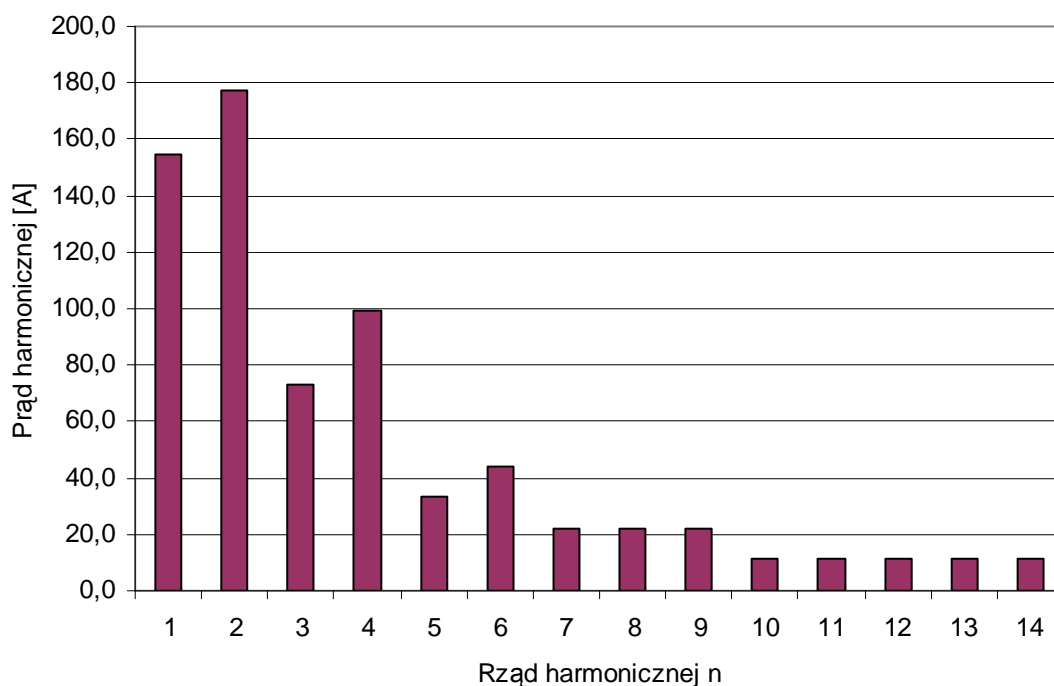
Przykładowe przebiegi czasowe poboru mocy czynnej oraz biernej przedstawiono na rys. 1 oraz 2. Wartości skuteczne wyższych harmonicznych prądu generowanych przez piec 140Mg/30kV zamieszczono na rys. 3.



Rys.1. Pobór mocy czynnej w poszczególnych fazach pieca łukowego 140Mg 30kV w Hucie Celsa Ostrowiec Św.



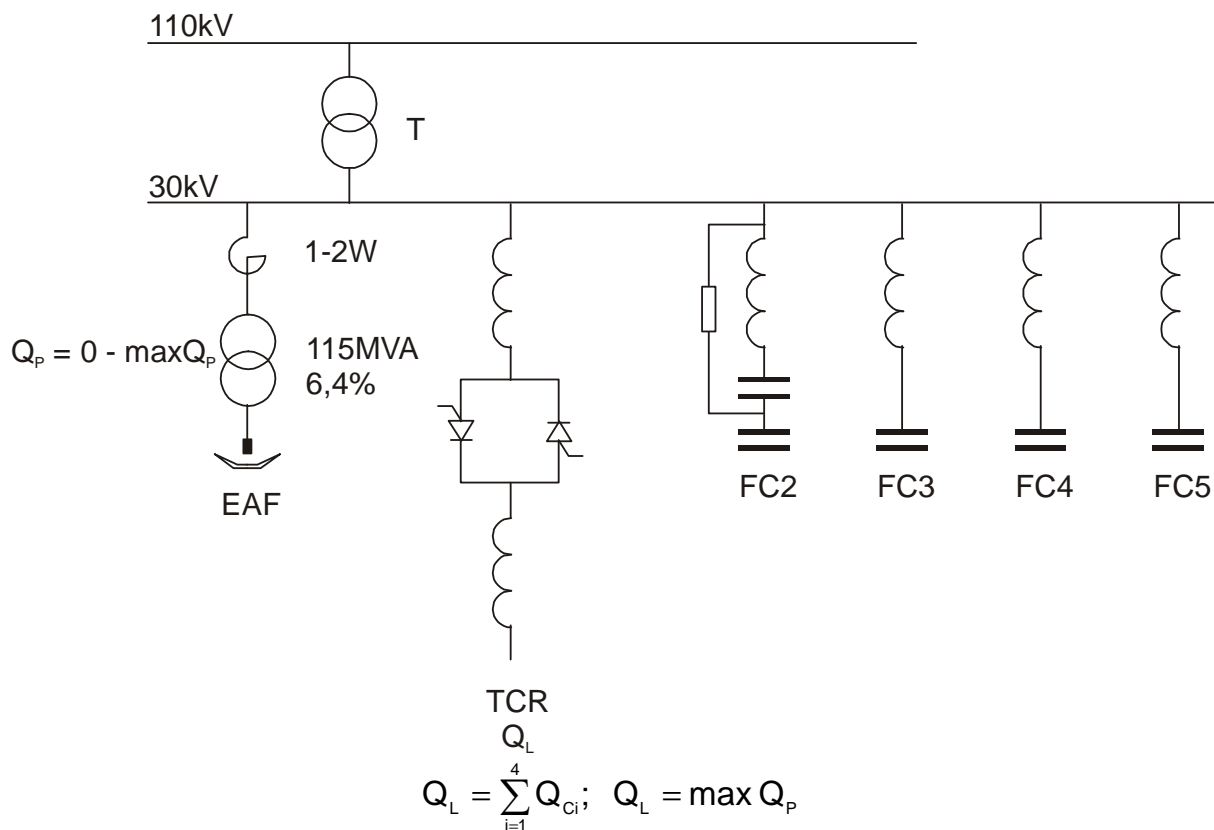
Rys.2. Pobór mocy biernej w poszczególnych fazach pieca łukowego 140Mg 30kV w Hucie Celsa Ostrowiec Św.



Rys.3. Spektrum wyższych harmonicznych generowanych przez piec łukowy w Hucie „Celsa” Ostrowiec Świętokrzyski

Wzrastające wymagania w zakresie poprawy jakości energii elektrycznej oznaczają konieczność stosowania nowoczesnych urządzeń, które nie tylko skompensują moc bierną, ale również obniżą poziomy wartości skutecznych wyższych harmonicznych prądu i napięcia w układzie zasilającym.

Uwzględniając dynamikę zmian obciążenia oraz aspekty ekonomiczne, najbardziej optymalnym jest system kompensacji nadążnej SVC z układem pasywnych filtrów RLC. Regulując kąty zapłonu w obwodzie dławików roboczych następuje dostosowanie mocy biernej pojemnościowej, w każdej fazie indywidualnie, do chwilowego zapotrzebowania. Filtry pasywne, najczęściej harmonicznych 2, 3, 4 i 5 załączone są na stałe do szyn układu zasilającego (rys. 4).



Rys.4. Zespół filtrów pasywnych w układzie SVC kompensacji nadążnej pieca łukowego

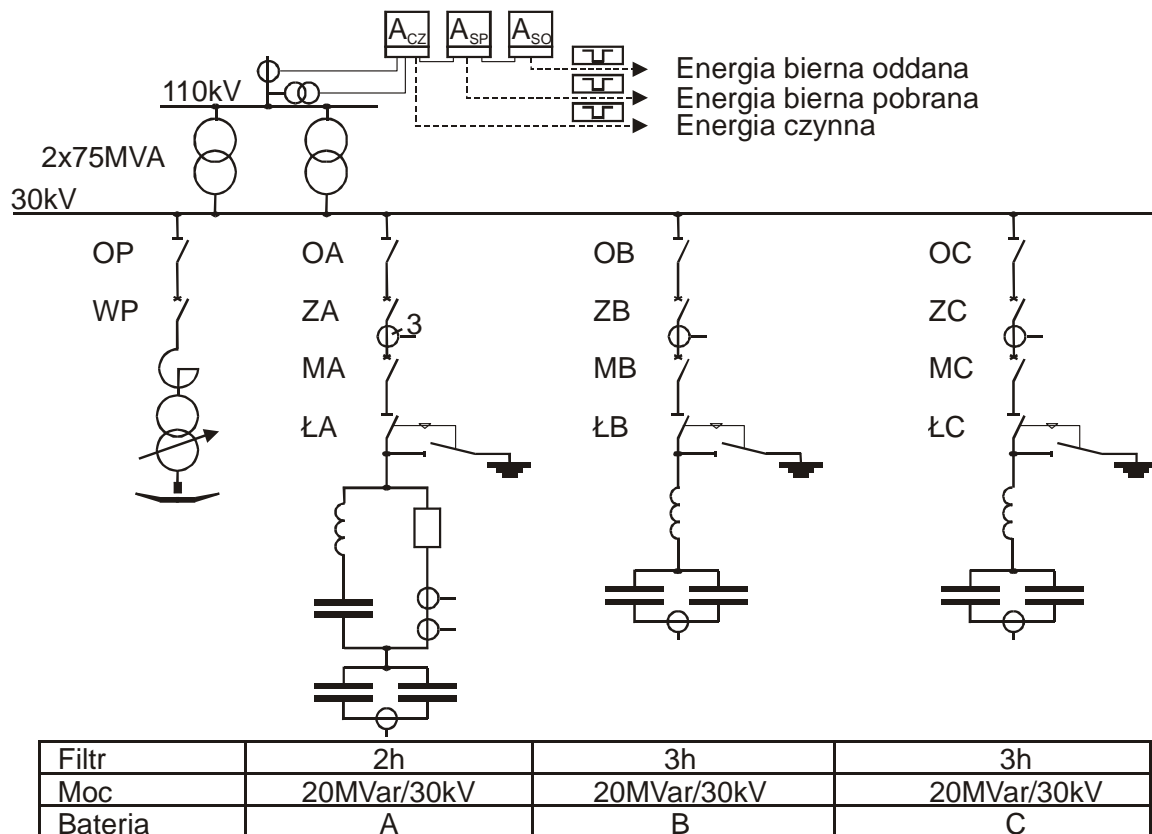
Zastosowanie układów kompensacji nadążnej gwarantuje:

- symetryzację pieca poprzez sterowanie niezależnie w każdej fazie,
- utrzymanie pożądanej wartości współczynnika mocy (praktycznie $\cos\phi=1$ na szynach średnich napięć),
- filtrację wyższych harmonicznym prądów i napięć do poziomów normatywnych,
- przy właściwym doborze filtrów pasywnych, wykluczenie możliwości wystąpienia zjawisk rezonansowych powodujących znaczne szkody w postaci uszkodzeń aparatów i urządzeń elektrycznych lub powodujących przerwy w pracy układu kompensacyjnego,
- sztuczne „usztynwienie” sieci zasilającej zwiększające moc pieca,
- skrócenie czasu wytopu,
- ograniczenie zużycia elektrod pieca łukowego,
- zmniejszenie zużycia energii czynnej na tonę wytapianej stali,
- redukcję flikeringu,
- uniknięcie konieczności częstej wymiany komór wyłączników próżniowych w polach zasilających automatycznie regulowanych baterii kondensatorów.

W rzeczywistych warunkach przemysłowych, uwzględniając aspekty ekonomiczne, często dokonuje się wyboru prostszych rozwiązań, takich jak:

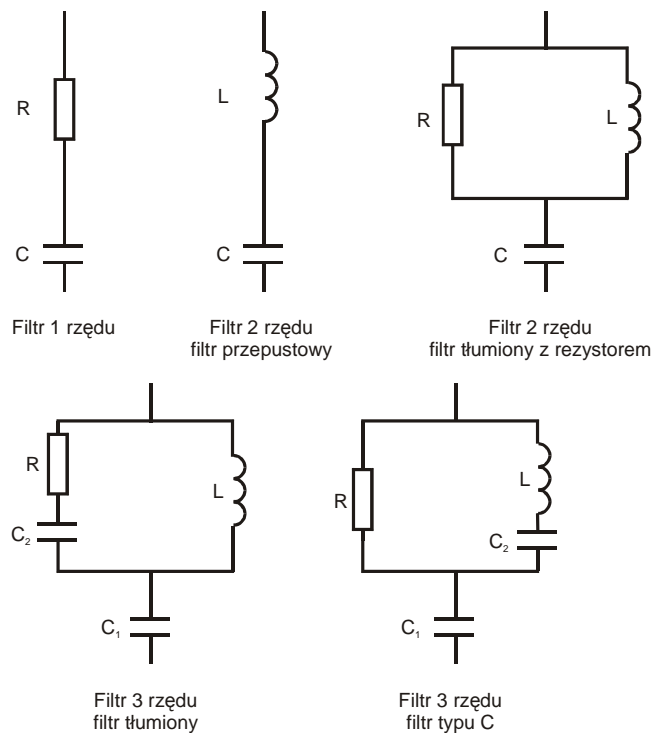
- stałego załączenia zespołu filtrów pasywnych na czas wytopu,
- zastosowania zespołu filtrów automatycznie regulowanych sterownikiem PLC z wykorzystaniem łączników stykowych.

Ten drugi wariant został zrealizowany w Hucie „Celsa” przez firmę „ELMA energia”, a układ kompensacji składa się z filtra pasywnego 2-giej harmonicznym o mocy rzeczywistej 20MVar/31,5kV (moc zainstalowana 55MVar) oraz dwóch filtrów 3h o mocy rzeczywistej po 20MVar/31,5kV każdy (moc zainstalowana po 35MVar). Schemat tego układu został przedstawiony na rys. 5.



Rys.5. Układ automatycznie regulowanej kompensacji mocy biernej pieca łukowego 140Mg, 30kV w Hucie Ostrowiec Św.

Niezależnie od wyboru konkretnego rozwiązania technicznego, instalacje kompensacji mocy biernej pieca łukowego zawierają filtry pasywne dostrójone do poszczególnych, filtrowanych wyższych harmonicznych prądu. Norma PN-EN61642 uwzględnia filtry pasywne zaprezentowane na rys. 6.



Rys.6. Typy filtrów pasywnych stosowanych w sieciach wysokich napięć w/g PN-EN61642

W praktyce, najczęściej stosowane są filtry LC 2-go rzędu. Jest to rozwiązanie najtańsze i w pełni uzasadnione w przypadku filtrowania jednej, dominującej, najczęściej najniższej występującej w spektrum, wyższej harmonicznej. Problemy kompensacji i filtracji znacznie się komplikują w przypadku filtracji kilku harmonicznych.

Należy podkreślić fakt, że ze względu na dopuszczalne normatywnie tolerancje pojemności C i indukcyjności L filtru 2-go rzędu, jak również zmiany parametrów filtru w czasie eksploatacji (utrata pojemności przez kondensatory, przebicia międzyzwojowe dławików rezonansowych), nie jest możliwe zagwarantowanie pełnej filtracji danej harmonicznej przez filtr pasywny LC 2-go rzędu. Ponadto, efekt filtracji w.h. zależy od „sztywności” sieci, czyli mocy zwarciowej w miejscu zainstalowania urządzeń kompensacyjno-filtracyjnych.

Występowanie wszystkich wyższych harmonicznych z reprezentatywnego spektrum pomimo zainstalowania filtrów pasywnych powoduje, że dla n-tej harmonicznej filtr n+1 rzędu stanowi odbiornik o charakterze pojemnościowym. Tym samym, istnieje możliwość występowania zjawisk rezonansowych, których źródłem będzie układ kompensacyjny i reaktancja indukcyjna układu zasilająco-rozdzielczego. Aby uniknąć takiej możliwości, należy zastosować dla najniższej filtrowanej (i występującej w spektrum) harmonicznej filtr wyższego rzędu, który zagwarantuje, że cały zespół filtrów w.h. dołączony do wspólnych szyn zbiorczych będzie stanowił odbiornik indukcyjny dla wszystkich występujących w spektrum harmonicznych (oczywiście poza harmoniczną podstawową, dla której zastosowana instalacja gwarantuje kompensację mocy biernej indukcyjnej). Takie możliwości daje filtr trzeciego rzędu RLC (z rezystancją tłumiącą). Osiągnięcie pożądanych rezultatów gwarantuje nie tylko właściwy dobór parametrów filtru (szczególnie rezystancji tłumiącej), ale również, w przypadku instalacji regulowanych automatycznie:

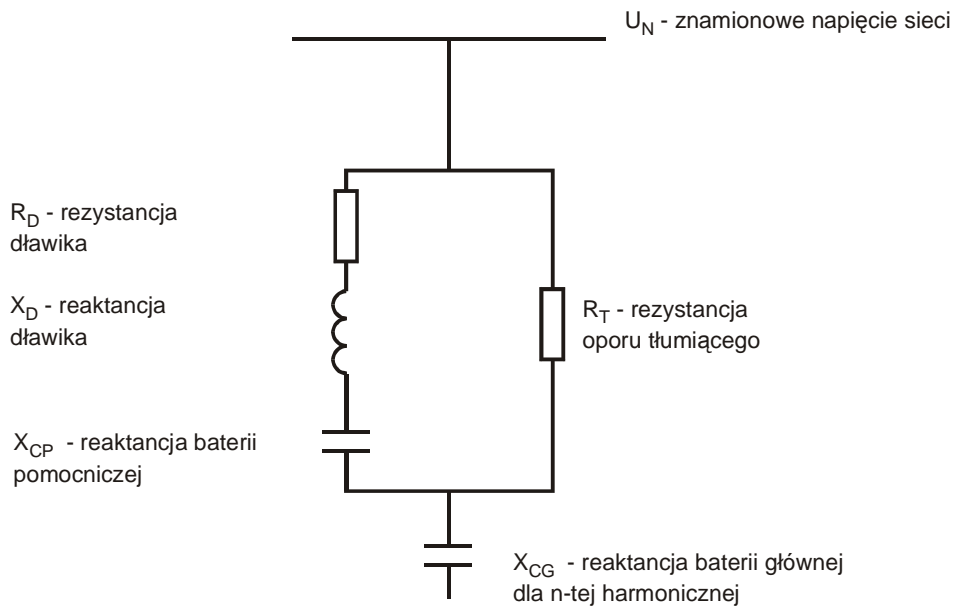
- załączanie filtrów w ściśle określonej kolejności – od filtru najniższej harmonicznej do najwyższej harmonicznej,
- odłączanie filtrów kolejności odwrotnej.

Pasywny filtr trzeciego rzędu stanowi bardzo interesujący przypadek elektrotechniczny, a w warunkach praktycznych realizacji jest wyjątkowo skomplikowany. Potwierdzeniem takiego twierdzenia jest nie tylko brak informacji literaturowych na ten temat ale również fakt, iż jedyną instalację tego typu w Polsce jest realizacja firmy „ELMA energia” w Hucie „Celsa”.

Z zastosowaniem filtru trzeciego rzędu typu „C” w w/w obiekcie wiążą się następujące skutki:

- radykalne obniżenie dobroci filtra, a co za tym idzie skuteczności filtracji,
- dodatkowe (minimalne) straty mocy czynnej,
- zagwarantowanie ograniczenia zawartości 2-giej harmonicznej,
- zapewnienie charakteru indukcyjnego zespołów filtrów 2h – 3h dla 2-giej harmonicznej, co wyklucza możliwość wystąpienia zjawisk rezonansowych w układzie instalacja kompensacyjna – reaktancja indukcyjna sieci,
- znaczne rozproszenie mocy wyższych harmonicznych w oporach tłumiących filtra typu „C”.

Uproszczony schemat jednej fazy filtru trzeciego rzędu przedstawiono na rys. 7.



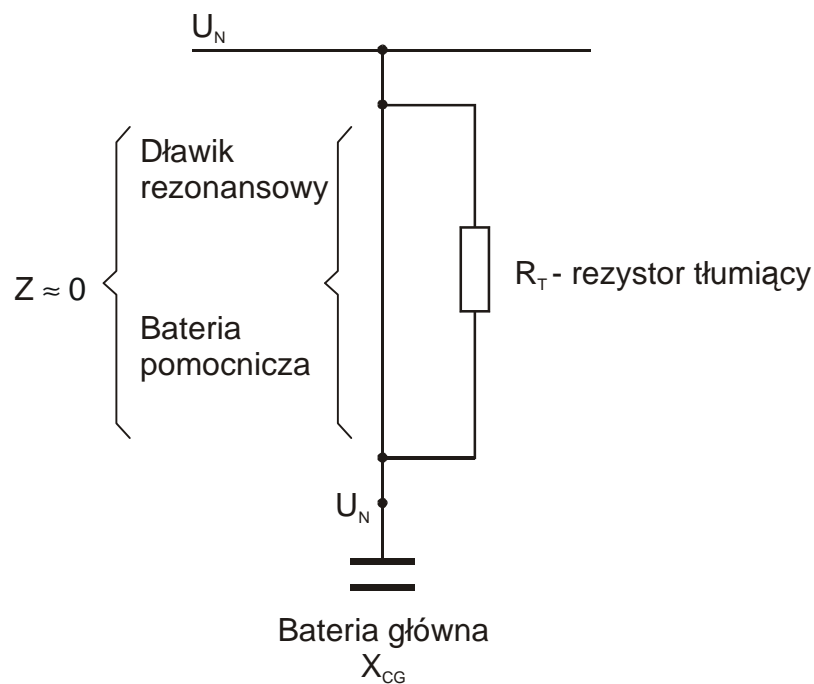
Rys.7. Pasywny filtr „C” 3-ciego rzędu

Podstawowe zależności określające zasady doboru parametrów reaktancyjnych są następujące:

$$X_D = X_{CP}$$

gdzie: X_D – reaktancja indukcyjna dławika rezonansowego,
 X_{CP} – reaktancja pojemnościowa baterii pomocniczej.

Powyższy warunek oznacza, że dla harmonicznej podstawowej 50Hz, pomijając rezystancje dławika i baterii, impedancja w tej części baterii jest zbliżona do zera (rys. 8), a na zaciskach baterii głównej o reaktancji X_{CG} utrzymuje się napięcie szyn zbiorczych, tym samym moc rzeczywista pojemnościowa filtru jest równa mocy baterii głównej.

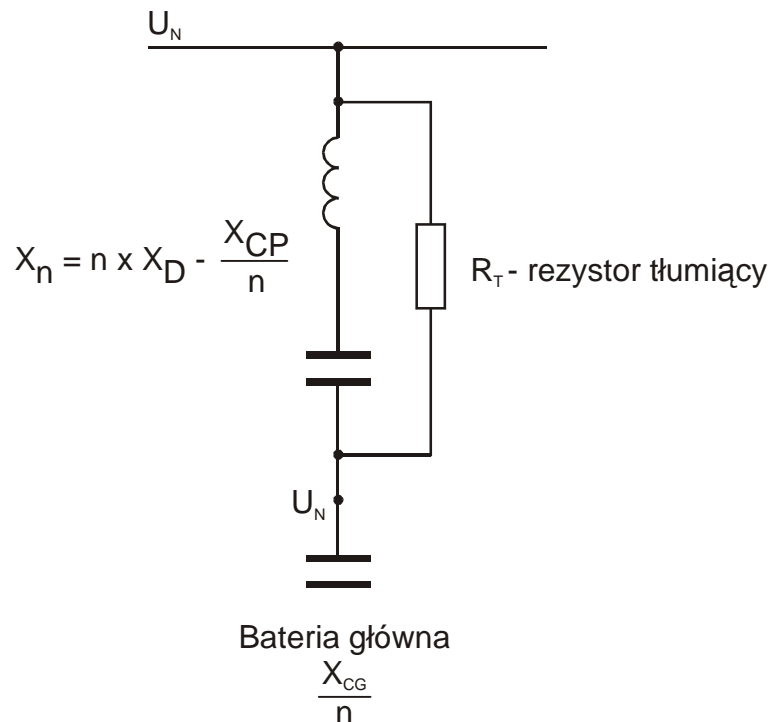


Rys.8. Zastępczy schemat jednokreskowy filtra typu „C” dla częstotliwości podstawowej 50Hz

Rząd częstotliwości rezonansowej własnej filtru, z pominięciem dobroci dławika szeregowego oraz rezystancji tłumiącej, wynosi:

$$n_r \approx \sqrt{\frac{X_{CP} + X_{CG}}{X_D}}$$

Dla n-tej harmonicznej parametry schematu zastępczego przyjmują postać, jak na rys. 9.

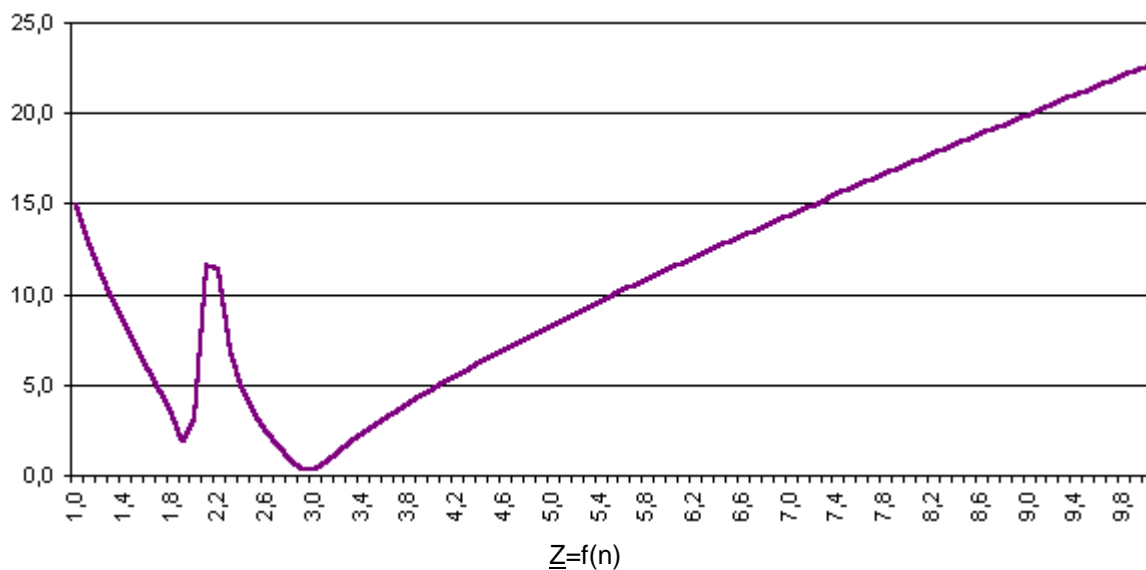


Rys.9. Zastępczy schemat jednokreskowy filtra typu „C” dla n-tej harmonicznej

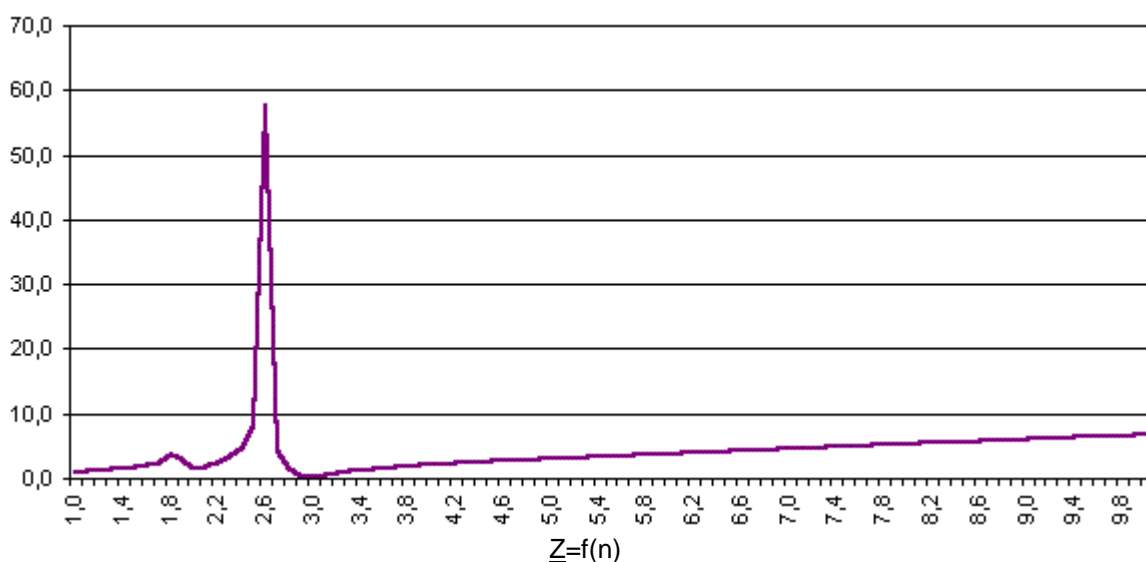
Najistotniejszym zagadnieniem projektowania filtra trzeciego rzędu (klasy „C”) jest dobór parametrów rezystora tłumiącego, który sprowadza się do takich problemów, jak:

- wartość rezystancji R_T zagwarantuje indukcyjny charakter całej instalacji filtracyjnej dla wszystkich wyższych harmonicznych występujących w emitowanym spektrum,
- moc rezystora zagwarantuje rozproszenie prądów wyższych harmonicznych zamykających się w tym obwodzie oraz prądu składowej podstawowej wynikającej z niedoskonałości filtrów pasywnych,
- zagwarantowanie właściwego poziomu izolacji.

Dla instalacji w Hucie „Celsa” przedstawionej na rys. 5, minimalną wartością rezystancji oporu tłumiącego R_T jest 208Ω . Charakterystyki częstotliwościowe w/w zespołu filtrów z rezystancją tłumiącą $R_T = 230\Omega$ przedstawiono na rys. 10, zaś charakterystyki częstotliwościowe zespołu filtrów z uwzględnieniem impedancji sieci zasilającej na rys. 11.



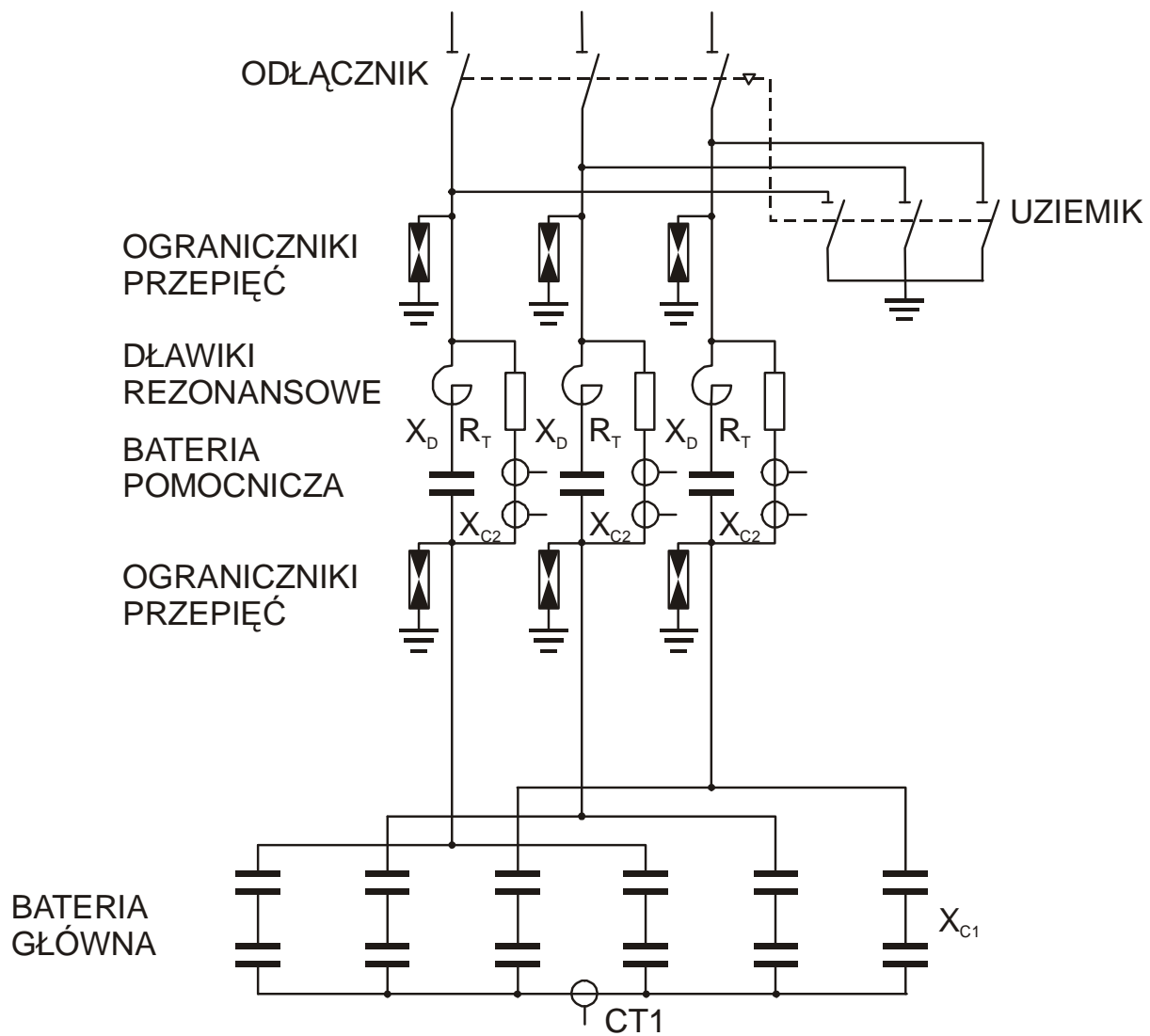
Rys.10. Charakterystyki częstotliwościowe zespołu filtrów pasywnych:
 - typu „C” 20MVar/30kV –2h ($R_T = 300\Omega$)
 - 2-go rzędu 40MVar/30kV – 3h



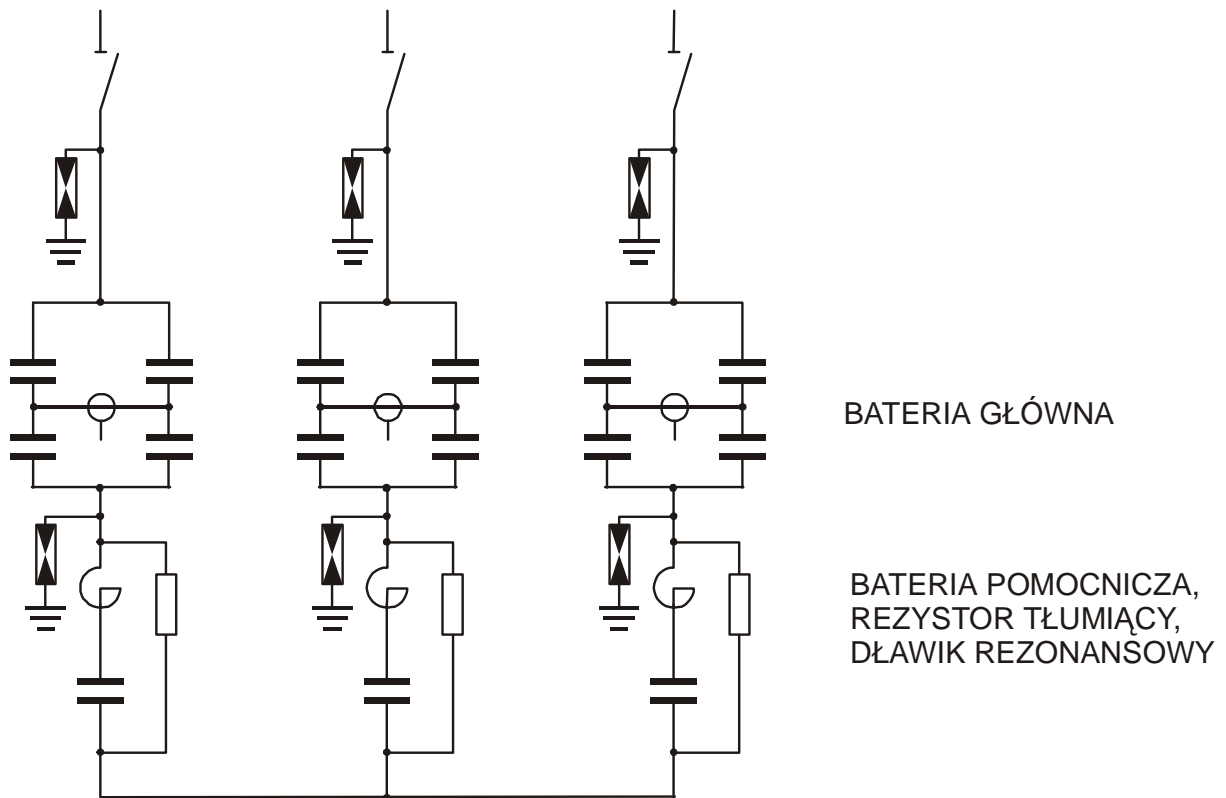
Rys.11. Charakterystyki częstotliwościowe zespołu filtrów pasywnych 2h i 3h z uwzględnieniem impedancji sieci zasilającej

W praktycznych realizacjach istnieją dwie możliwości realizacji filtru trzeciego rzędu typu „C”:

- bateria główna skonfigurowana jest w układzie podwójnej gwiazdy (rys. 12),
- bateria główna stanowi układ połączeń typu „H” (rys. 13).



Rys.12. Praktyczna realizacja filtra typu „C” w systemie trójfazowym z baterią główną w układzie podwójnej gwiazdy



Rys.13. Praktyczna realizacja filtra typu „C” w systemie trójfazowym z baterią główną w układzie „H”

Wybór konkretnego rozwiązania (rys. 12 i 13) rzutuje radykalnie na warunki zwarciove pracy instalacji kompensacyjnej. W przypadku pierwszym (bateria główna skojarzona w układzie podwójnej gwiazdy), przy zwarciu na zaciskach baterii wystąpią przebiegi, których nie zmniejszą do bezpiecznych poziomów dostępne ograniczniki, gdyż:

- dla składowej okresowej prądu zwarcia (50Hz) reaktancja baterii pomocniczej z dławikiem rezonansowym stanowi praktycznie wartość zerową co oznacza przepływ tej składowej przez baterię pomocniczą o wartości jak w przypadku zwarcia na szynach zbiorczych.
- przepływ prądów zwarciowych o dużej wartości przez baterię pomocniczą powoduje bardzo wysokie straty napięcia na poszczególnych elementach składowych (X_D , X_{CP}); w przypadku Huty „Celsa” przebiegi te będą przekraczały 300kV.

W przypadku skojarzenia baterii głównej w układ „H”, zwarcia w obrębie baterii pomocniczej będą objawiały się prądami o wartości niższej od prądu znamionowego instalacji filtracyjno-kompensacyjnej.

Dodatkowym problemem w obu rozpatrywanych przypadkach jest zabezpieczenie baterii pomocniczej i rezystora tłumiącego. Należy zwrócić uwagę na fakt, że te zabezpieczenia muszą reagować na:

- składową podstawową 50Hz prądu dla zabezpieczenia baterii pomocniczej,
- wszystkie harmoniczne dla zabezpieczenia rezystora tłumiącego.

Podsumowanie i wnioski

1. Ze względu na walory ekonomiczne stosowanie filtrów pasywnych RLC i LC będzie dominowało w praktycznych realizacjach układów kompensacyjno-filtracyjnych tak niespokojnych odbiorów, jak piece łukowe.
2. W przypadku pieców łukowych, istnieje najczęściej konieczność zastosowania filtrów kilku harmonicznym.

3. Uwzględniając niedoskonałości filtrów pasywnych dla najniższej występującej w spektrum i filtrowanej harmonicznej należy, w układach złożonych z wielu filtrów, stosować filtr trzeciego rzędu, który wykluczy występowanie zjawisk rezonansowych między reaktancją indukcyjną układu zasilającego a układem kompensacyjno-filtrującym.
4. Konfiguracja połączeń filtra trzeciego rzędu typu „C” w sposób istotny wpływa na warunki zwarciove i system zabezpieczenia przed ich skutkami.