

Zbigniew Szulc, Politechnika Warszawska, Warszawa  
 Krzysztof Faldyga, Horus-Energia, Warszawa

## ZASTOSOWANIE AGREGATU PRĄDOTWÓRCZEGO I PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI DO ROZRUCHU SILNIKA POMPY WODY ZASILAJĄCEJ W WARUNKACH AWARII KATASTROFALNEJ

### APPLICATION OF GENERATION SET AND FREQUENCY CONVERTER TO STARTING OF WATER SUPPLY PUMP MOTOR IN HEAT AND POWER STATION UNDER BLACKOUT CONDITIONS

**Abstract:** In power station or combined heat and power station the biggest drive (in respect of power) is water supply pump drive. Under blackout conditions this drive is supplying from generator in power plant several hundreds kilometers away, which works as an island. Starting of this drive is difficult in such conditions. In this article potential application of a local generator set is presented.

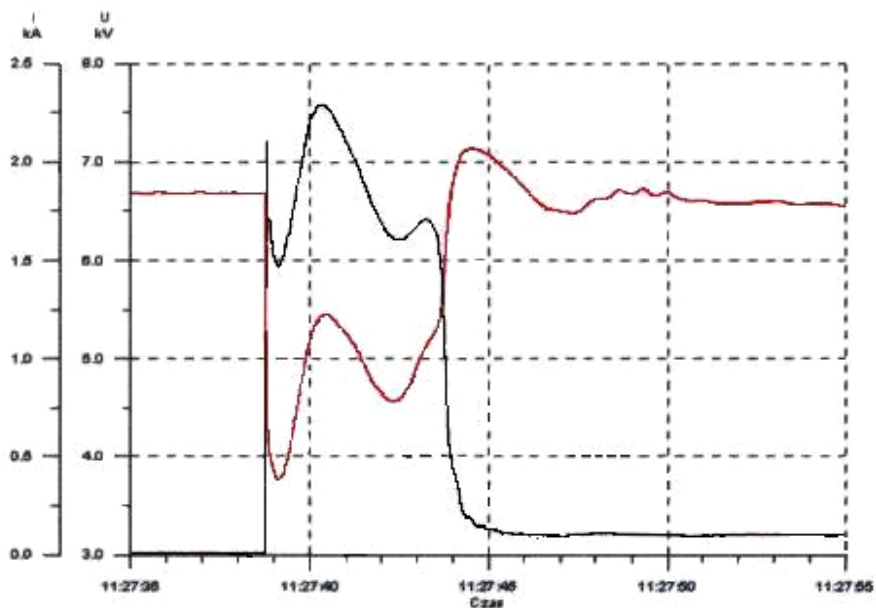
#### 1. Wstęp

Awaria katastrofalna (blackout) w obiekcie typu elektrownia lub elektrociepłownia zmusza do korzystania z rezerwowych źródeł zasilania w celu powrotu takiego obiektu do normalnej eksploatacji. Najczęściej w takim przypadku tym rezerwowym źródłem zasilania jest inny obiekt tego samego typu (lub jego część – np. jeden lub dwa generatory) pracujący jako tzw. wyspa. Największymi odbiornikami energii elektrycznej, które należy uruchomić po takiej awarii są napędy pomp wody zasilającej i wentylatorów. Moc rezerwowych źródeł zasilania jest ograniczona i czasem tylko kilka razy większa od mocy znamionowych tych napędów (np. silniki napędowe pomp wody zasilającej o mocy znamionowej 4MW, wentylatorów – 1,6 MW). Równocześnie rezerwowe źródła zasilania są często w odległości setek km co zmusza do kilkukrotnej transformacji energii elektrycznej (przesył przez linie 110kV, 220 kV). Jest to przyczyną dużego spadku napięcia i niepewnego rozruchu układów napędowych dużej mocy. Autorzy referatu proponują zastosowanie do rozruchu napędów dużej mocy agregatów prądotwórczych (zastosowanych jako miejscowe źródło rezerwowego zasilania) i przemienników częstotliwości średniego napięcia.

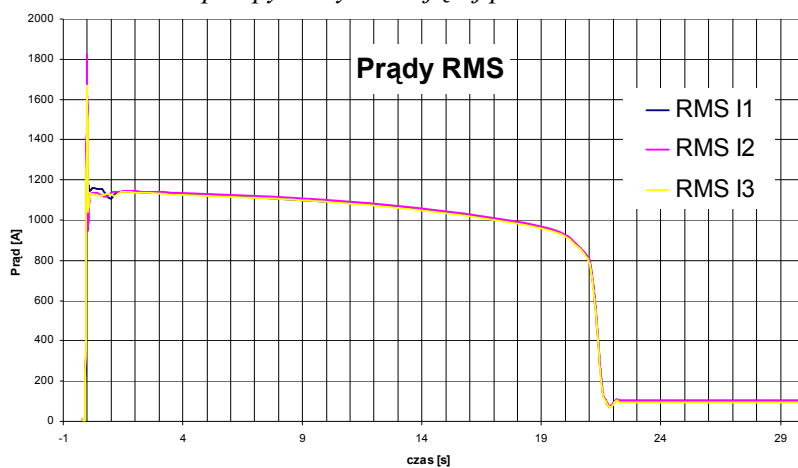
#### 2. Przykłady rozruchu układów napędowych dużej mocy

Jako przykład rozruchu układu napędowego dużej mocy zasilanego z rezerwowego źródła energii elektrycznej przedstawiony zostanie

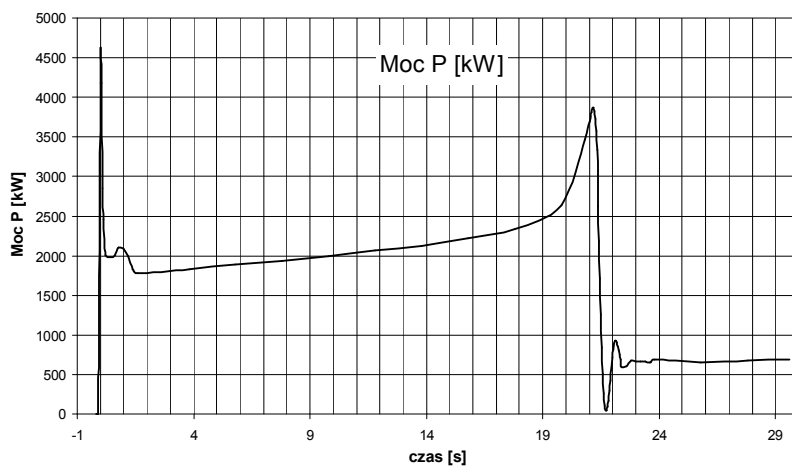
rozruch silnika o mocy 4 MW i napięciu znamionowym 6 kV [1]. Silnik indukcyjny klatkowy napędza pompę wody zasilającej i w warunkach blackout'u elektrociepłowni zostaje przyłączony poprzez transformator linią zasilającą 110 kV i jeszcze jeden transformator, do dwóch generatorów pracujących równolegle (o mocy znamionowej 30 MVA każdy) jako wyspa. Na rys. 1 zostały przedstawione przebiegi wartości skutecznych prądu i napięcia zasilających ten silnik. Największa wartość prądu osiągnęła 2300A a najmniejsza wartość napięcia wynosiła 3800V. Rozruch dokonał się w ciągu ok. 6s przy momencie nie przekraczającym 0,4 momentu znamionowego przy maksymalnej prędkości. Duży spadek napięcia (ponad 36%) znacznie ograniczył moment rozwijany przez silnik, co groziło utknięciem. Na dwie dokonane próby tylko jedna zakończyła się sukcesem. Z powyższego opisu wynika, że nie jest to pewny sposób dokonywania rozruchu w warunkach blackout'u elektrociepłowni. Dokładna analiza energetycznych zjawisk rozruchowych silnika wykazuje, że w początkowej fazie rozruchu pobierana jest duża wartość mocy czynnej (straty) i biernej (magnesowanie). Na rys. 2 zostały przedstawione przebiegi chwilowe prądu i mocy czynnej podczas rozruchu silnika o mocy 1600 kW i napięciu znamionowym 6 kV, napędzającym wentylator powietrza. Silnik zasilany był z sieci o mocy zwarciowej 150MVA. Chwilowa moc czynna obliczona była jako średnia wartość iloczynu prądu i napięcia za okres:



Rys. 1. Przebiegi wartości skutecznych prądu (kolor czarny) i napięcia (kolor czerwony) silnika pompy wody zasilającej podczas rozruchu



Rys. 2a. Przebiegi wartości skutecznych prądów w trzech fazach silnika wentylatora powietrza podczas rozruchu



Rys. 2b. Przebieg mocy czynnej pobieranej przez silnik wentylatora powietrza podczas rozruchu

$$P = \frac{1}{T} \int U * Idt \quad (1)$$

Z przebiegu funkcji  $P = f(t)$  wynika, że w początkowej chwili (ok. 1s) silnik pobiera moc czynną o dużej wartości (kilka razy większej od znamionowej). Równocześnie prędkość silnika jest wówczas bardzo mała co oznacza, że moc wyjściowa (na wale)  $P_w$  jest minimalna. Ponieważ:

$$P_w = M * \Omega \quad (2)$$

przy czym:

$M$  – moment obrotowy silnika – [Nm]

$\Omega$  – prędkość kątowna silnika - [1/s]

$P_w$  – moc mechaniczna – [W]

więc moc dostarczana do silnika ze źródła energii elektrycznej jest w większości tracona w silniku i to głównie na straty mocy w rezystancjach stojana i wirnika.

### 3. Rozruch silnika zasilanego z zespołu prądowłórczego

Analiza procesów przejściowych podczas rozruchu silnika klatkowego zasilanego z zespołu prądowłórczego wskazuje na podobieństwo zjawisk gdy zasilanie pochodzi z sieci energetycznej. Jednak podobieństwo dotyczy zjawisk tylko silnika. Źródło zasilania, w przypadku agregatu prądowłórczego ma znacznie mniejszą moc zwarciovą a silnik mechaniczny napędzający prądnicę nie posiada dużych możliwości przeciążenia. Z tego względu moc agregatu musi być znacznie większa (kilka razy) od mocy silnika elektrycznego. Jeżeli założymy, że tak jak wynika z rozdziału poprzedniego moc pobierana w pierwszych chwilach rozruchu z agregatu zwiększa się, głównie na straty ( $P_r$ ) na rezystancjach stojana i wirnika ( $R_s + R_r$ ) to można napisać:

$$P_r = 3(R_s + R'_r)I_r^2 \quad (3)$$

przy czym:

$R_s$  – rezystancja jednej fazy stojana – [ $\Omega$ ]

$R'_r$  – rezystancja zastępcza fazy wirnika sprowadzona do obwodu stojana – [ $\Omega$ ]

$I_r$  – prąd rozruchowy silnika przy znamionowych warunkach zasilania [A]

Odnosząc tę moc do mocy znamionowej ( $P_N$ ) silnika można obliczyć jaką mocą czynną powinien dysponować agregat prądowłórczy ( $P_a$ ) aby dokonać rozruchu silnika. Na podstawie powyższych stwierdzeń można oszacować w przybliżeniu moc agregatu prądowłórczego korzystając z zależności:

$$\frac{P_r}{P_N} = \frac{P_a}{P_N} = \frac{(p_R - \sqrt{p_R^2 - 1})k_r^2 k_i^2}{2 p_M (1 + s_N) \cos \varphi_N^2 \eta_N^2} \quad (4)$$

przy czym:

$$p_R = \frac{M_{\max}}{M_r}$$

$$p_M = \frac{M_{\max}}{M_N}$$

$$k_r = \frac{I_r}{I_N}$$

$$k_i = f\left(\frac{R}{X}\right)$$

$s_N$  – poślizg znamionowy silnika

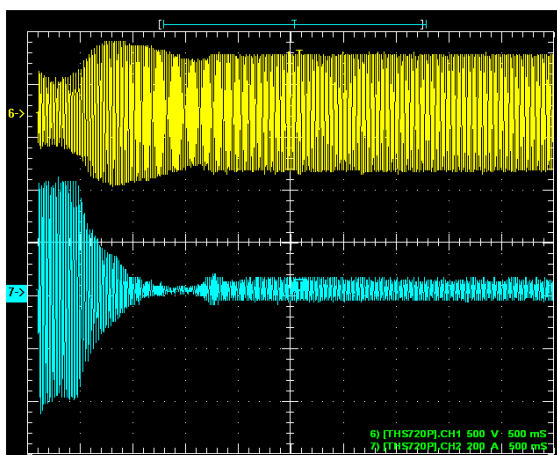
$\cos \varphi_N$  – współczynnik mocy znamionowy silnika,

$\eta_N$  – sprawność znamionowa silnika,

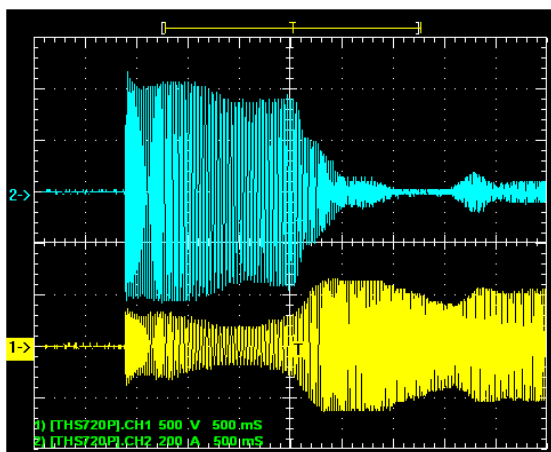
$M_{\max}$  – moment maksymalny (krytyczny) silnika w warunkach znamionowego zasilania,

$M_r$  – moment rozruchowy silnika w warunkach znamionowego zasilania.

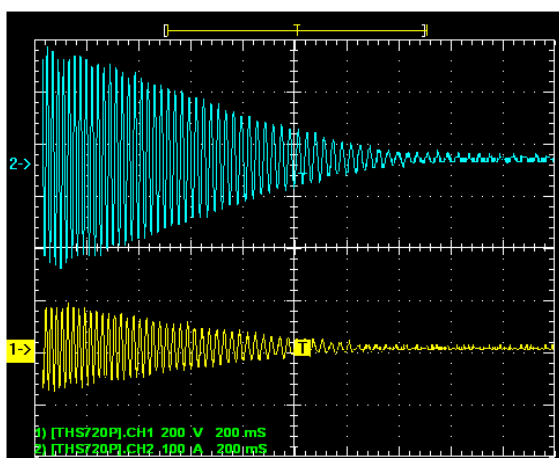
Wszystkie podane powyżej parametry są dostępne w katalogach silników lub u producenta. Jedynie parametr  $k_i$  należy obliczyć na podstawie zastępczej rezystancji i reaktancji silnika podczas rozruchu. Wartość jego najczęściej wynosi od 1,3 dla małych mocy silników do 1,8 dla dużych mocy. Na rys 3 zostały przedstawione oscylogramy prądów i napięć zasilających silnik klatkowy o mocy znamionowej 45 kW i napięciu znamionowym 380 V oraz prędkości synchronicznej 1500 obr/min. Silnik był zasilany z agregatu prądowłórczego o mocy 160 kVA i napięciu 400 V. Moc agregatu dobrano według wyżej przedstawionych zasad. Na rys. 3a zostały przedstawione oscylogramy wykonane podczas rozruchu nieobciążonego silnika a na rys. 3b przy obciążeniu początkowym równym 0,4  $M_N$  ( $M_N$  – moment znamionowy silnika). W obu przypadkach rozruch odbywał się bez zakłóceń. Przy zasilaniu tego silnika z agregatu o mocy 88 kVA, pomimo braku obciążenia na wale rozruch nie został dokonany. Oscylogram prądu i napięcia nieudanej próby został przedstawiony na rys. 4. Agregat tej mocy nie spełnia warunku (4). Należy zauważyć, że zależność (4) pozwala z pewnym przybliżeniem dokonać doboru mocy agregatu.



Rys.3a. Oscylogram napięcia (przebieg górny) i prądu (dolny) silnika 45 kW bez obciążenia przy zasilaniu z agregatu prądotwórczego 160 kVA



Rys.3b. Oscylogram napięcia (przebieg dolny) i prądu (górny) silnika 45 kW z obciążeniem początkowym równym  $0,4M_N$  przy zasilaniu z agregatu prądotwórczego 160 kVA



Rys.4. Oscylogram nieudanego rozruchu silnika 45 kW bez obciążenia zasilanego z agregatu 88 kVA

W rzeczywistości agregat posiada regulator napięcia i w zależności od jego dynamiki i właściwości eksploatacyjnych, producent podaje jak przeprowadzać dobór parametrów agregatu do danego silnika. Wszystkie agregaty (160 kVA, 88 kVA i 40 kVA) podczas badań były serwisowane przez firmę dostarczającą te urządzenia, a ich parametry zostały wzięte z danych katalogowych [2]. Oszacowanie na podstawie (4) daje większe wartości mocy agregatów niż na podstawie zaleceń producenta, ale mogą być wykorzystywane do wstępnego doboru.

#### 4. Zastosowanie przemiennika częstotliwości zasilanego z agregatu prądotwórczego do rozruchu silnika

Włączenie pomiędzy agregat prądotwórczy a silnik przemiennika częstotliwości pozwala dokonać rozruchu silnika w sposób kontrolowany bez przetężeń. Efektem tego jest zastosowanie agregatu prądotwórczego o mocy 40 kVA. Przemiennik częstotliwości sterował silnikiem najprostszą (tj. skalarną) metodą, zapewniającą tylko stały strumień stojana. Na rys. 5 zostały przedstawione oscylogramy prądów i napięć zasilających przemiennik częstotliwości podczas rozruchu silnika bez obciążenia (rys. 5a) i z początkowym obciążeniem równym  $0,4M_N$  (rys. 5b). Z analizy zjawisk i oscylogramów wynika, że moc agregatu może być mniejsza od mocy silnika. Dobór mocy agregatu zależy głównie od rzeczywistego momentu obciążenia silnika. Sterowanie metodą wektorową (DTC lub FOC) może jeszcze bardziej zoptymalizować dobór mocy agregatu prądotwórczego.

#### 5. Zastosowanie agregatu prądotwórczego do rozruchu silników dużej mocy i średniego napięcia

Analiza techniczno-ekonomiczna przeprowadzona przez autorów artykułu wykazała, że optymalnym rozwiązaniem dla rozruchu silnika pompy wody zasilającej jest zastosowanie agregatu prądotwórczego niskiego napięcia i transformatora podwyższającego. Na rys. 6 został przedstawiony schemat ideowo-blokowy takiego układu. Jeżeli układ ma służyć tylko do rozruchu to przed przełączeniem silnika po rozruchu z agregatu do sieci następuje synchronizacja agregatu z siecią. Umożliwia to układ synchronizujący w jaki został wyposażony agregat i łączniki średniego napięcia. Na podstawie metody doboru mocy agregatu stwier-

dzono, że należy zastosować trzy połączone równolegle agregaty o mocy 2200 kVA (obciążenie silnika stanowi pompa wody zasilającej z zamkniętymi zasuwami). Zastosowanie przeziennika częstotliwości średniego napięcia umożliwia zastosowanie tylko jednego agregatu prądowórczego. Na rys. 7 został przedstawiony schemat ideowo-blokowy takiego układu. Agregat prądowórczy o mocy znamionowej  $S_N = 2200$  kVA, napięciu znamionowym  $U_N = 400$  V i prądzie znamionowym 2887 A zasila transformator podwyższający 0,4 kV / 6,3 kV o mocy  $S_{TN} = 2500$  kVA i przeziennika częstotliwości o zakresie częstotliwości wyjściowej 2 Hz ÷ 50 Hz, napięciu znamionowym wyjściowym 0 ÷ 6000 V, prądzie znamionowym wyjściowym 450 A z obwodem wejściowym 18-pulsowym.

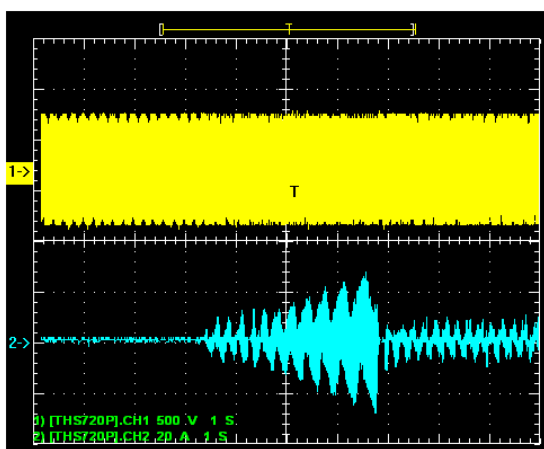
Przeziennik częstotliwości typu PowerFlex 7000 [3] jest eksploatowany w Polsce (kilka egzemplarzy w elektrociepłowniach) i charakteryzuje się sinusoidalnym napięciem wyjściowym (THD < 8%) i niewielkim odkształceniem prądu wejściowego (THD < 6%). Umożliwia sterowanie wektorowe prądem silnika oraz syn-

chroniczny transfer do sieci energetycznej przy by-passowaniu silnika. Agregat prądowórczy typu HE-P2200 jest też dostarczany i eksploatowany w kraju [2].

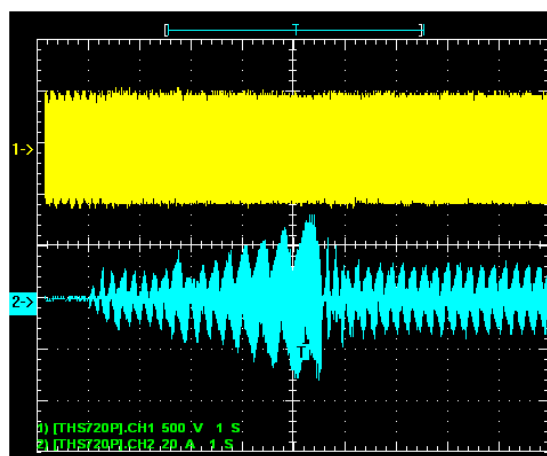
## 6. Wnioski

Zastosowanie agregatu prądowórczego z przeziennikiem częstotliwości do rozruchu silnika pompy wody zasilającej w elektrociepłowni przy wychodzeniu z blackoutu umożliwia osiągnięcie szeregu korzystnych właściwości eksploatacyjnych:

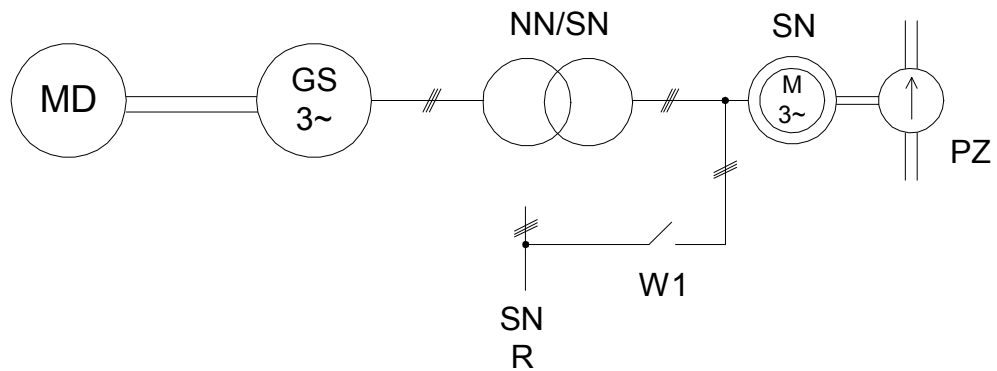
- nie obciąża rezerwowej sieci zasilającej
- rozruch silnika jest łagodny i pewny (przy równoczesnym zastosowaniu przeziennika częstotliwości)
- w przypadku tylko rozruchu umożliwia synchroniczne przełączenie do sieci energetycznej
- po dokonaniu rozruchu może być wykorzystany do rozruchu innego silnika
- elementy zastosowane w tym układzie są dostarczane i eksploatowane przez firmy krajowe [4]



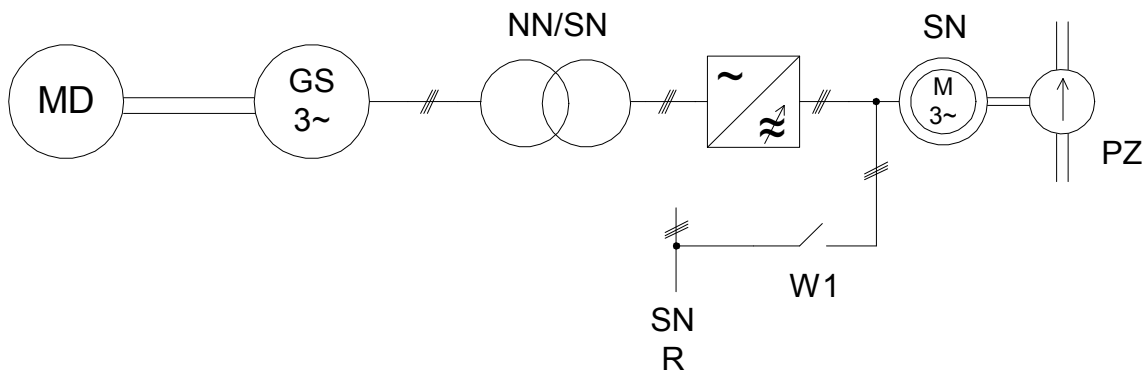
Rys.5a. Oscylogram napięcia (przebieg górny) i prądu (dolny) agregatu 40 kVA zasilającego przeziennik częstotliwości sterujący silnikiem 45 kW bez obciążenia podczas rozruchu



Rys.5b. Oscylogram napięcia (przebieg górny) i prądu (dolny) agregatu 40 kVA zasilającego przeziennik częstotliwości sterujący silnikiem 45 kW z obciążeniem  $0,4M_N$  podczas rozruchu



Rys.6. Schemat ideowo-blokowy układu rozruchowego silnika pompy wody zasilającej z zastosowaniem agregatu niskiego napięcia i transformatora podwyższającego



Rys.7. Schemat ideowo-blokowy układu rozruchowego silnika pompy wody zasilającej z zastosowaniem przemiennika częstotliwości średniego napięcia, transformatora podwyższającego i agregatu niskiego napięcia

## 7. Literatura

- [1] Jendroszczyk J., Kurzyński A., Rzeczkowski E.: *Elektrociepłownia Ostrołęka jako źródło napięcia i mocy rozruchowej dla Elektrociepłowni Siekierki w wypadku awarii katastrofalnej*. Energetyka, Nr 2/2004
- [2] *Katalog agregatów prądotwórczych HORUS-ENERGIA* r. 2005

- [3] *Katalog przemienników częstotliwości średniego napięcia PowerFlex 7000* – Rockwell Automation 2005
- [4] Koczara W., Szulc. Z.: *Zastosowanie przekształtników energoelektronicznych do rozruchu silników indukcyjnych prądu przemiennego dużej mocy*. IV Krajowa Konferencja Naukowa SENE 2003