

# Przegląd rozwiązań kompensatorów synchronicznych na świecie

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono charakterystykę rozwiązań kompensatorów synchronicznych stosowanych na świecie. Ich unikalne własności techniczne pozycjonują je jako kluczowe środki poprawy stabilności systemów elektroenergetycznych. Wyniki dokonanego przeglądu mogą być szczególnie istotne dla operatorów Krajowego Systemu Elektroenergetycznego oraz właścicieli wycofywanych klasycznych jednostek wytwórczych, w perspektywie rosnącego nasycenia Krajowego Systemu Elektroenergetycznego odnawialnymi źródłami energii.

**Abstract.** The results of the overview may be particularly important for the operators of the polish power system and the owners of the classic generating units being withdrawn, in the perspective of the growing saturation of the power system with renewable energy sources. (A global review or synchronous condenser solutions).

**Słowa kluczowe:** kompensator synchroniczny, dynamiczna kompensacja mocy biernej, inercja, moc zwarciova.

**Keywords:** synchronous condenser, dynamic reactive power compensation, inertia, short circuit currents, short-circuit power

## Wprowadzenie

Przewidywana zmiana struktury systemu elektroenergetycznego (SEE), w tym w szczególności struktury sektora wytwórczego, gdzie dominującą rolę będą odgrywać niestabilne jednostki wytwórcze w postaci źródeł fotowoltaicznych i wiatrowych oraz nieregulowalne obecnie z poziomu operatora systemu przesyłowego (OSP) źródła rozproszone, zmieniają diametralnie charakter stanów przejściowych występujących w SEE [1]. Szczegółowo do efektów transformacji SEE należy zaliczyć:

- dużą różnorodność jednostek wytwórczych i wycofywanie konwencjonalnych jednostek bazujących na generatorach synchronicznych;
- wzrost złożoności przyszłego SEE;
- wzrastający udział obiektów z elementami energoelektronicznymi;
- niską inercję – powodującą zwiększenie dynamiki stanów przejściowych;
- niską moc zwarciową – powodującą m.in. głębsze zapady napięć, dużą podatność na odkształcenia przebiegu napięcia oraz problemy z właściwą identyfikacją i eliminacją zakłóceń zwarciowych.

Stabilna praca SEE jest niezbędna do zapewnienia niezawodnych dostaw energii elektrycznej. Uwzględniając efekty transformacji SEE, można przypuszczać, że w miarę przesuwania się miksu wytwórczego w kierunku energii odnawialnej operatorom SEE coraz trudniej będzie dotrzymać odpowiednich stabilności SEE. Dlatego gwarancją utrzymania właściwego poziomu stabilności przyszłego SEE będzie instalacja odpowiednich środków gwarantujących poprawę tej stabilności w stanach przejściowych. Jednym z takich środków mogą być kompensatory synchroniczne (KS).

Z uwagi na dobre zdolności techniczne KS w zakresie poprawy stabilności SEE rozwój KS jest obserwowany obecnie u wszystkich operatorów na świecie, u których występuje dynamiczny rozwój odnawialnych źródeł energii. W Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE) do tej pory nie są instalowane KS przyłączane do sieci przesyłowej lub dystrybucyjnej. Jednak analizy dotyczące planów rozwoju KSE wskazują na potrzebę rozwoju instalacji KS. Kluczowe informacje w tym zakresie zamieszczono m.in. w [2]. W przywołanym planie rozwoju KSE uwzględnia się zarówno budowę nowych KS (tab. 1), jak i ich pozyskanie z istniejących jednostek wytwórczych, które będą wycofywane.

Tabela 1. Wybrane efekty zadań inwestycyjnych planowanych w KSE na lata 2023-2036 [2]

Rodzaj efektu	2023-2032	Po roku 2032	2023-2036
Przyrost zdolności kompensacji mocy biernej [Mvar], z czego:	2 100	0	2 100
nowe dławiki [Mvar]	1050	0	1 050
nowe kompensatory synchroniczne [Mvar]	1050	0	1 050

Należy podkreślić, że dane dotyczące przyrostu zdolności kompensacji mocy biernej przytoczone w tabeli 1 planowane były przy założeniu, że znaczna część gospodarki mocą bierną oraz zapewnianie stabilności pracy KSE będzie realizowane z wykorzystaniem istniejących źródeł wytwórczych, m.in. planowanych do wycofania z eksploatacji, o zakresie +/- 3000÷5000 Mvar. Zatem wzięto pod uwagę możliwość wykorzystania generatorów z wyłączanych z eksploatacji bloków węglowych do pracy jako KS. Tego typu działania określa się jako retrofit.

Uwzględniając przytoczone informacje, stwierdza się, że w KSE w najbliższym okresie wystąpi dynamiczny rozwój KS (nowych oraz z retrofitu). Rozpoznanie praktyk w zakresie kształtowania układów KS na świecie stanowi istotną wartość dodaną przy wyborze rozwiązań inwestycyjnych. Jest to kluczowa przesłanka, która stanowiła podstawę realizacji przeglądu rozwiązań KS na świecie. Wybrane efekty przeglądu przedstawiono w niniejszym artykule.

## Charakterystyka KS

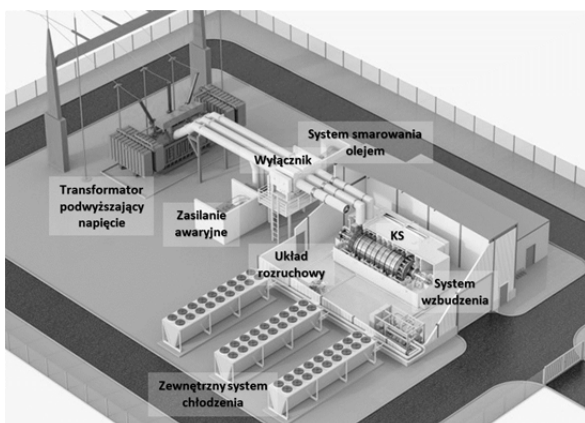
KS, inaczej nazywane również generatorami mocy biernej, pracują jak silnik synchroniczny nieobciążony momentem na wale, pobierając z SEE nieznaczną moc czynną na pokrycie strat w maszynie, mając jednocześnie możliwość generacji mocy biernej, generacji prądu zwarciowego (poprawy sztywności sieci – ang. *system strength*) oraz inercyjnego podtrzymywania stabilności częstotliwości [3, 4]. KS to dobrze znane rozwiązanie z ostatnich 80-90 lat. Dynamiczne zdolności regulacji napięcia przez KS spowodowały, że układy te były często wykorzystywane w miejscach wymagających poprawy jakości napięcia. W toku postępu technologicznego, występującego w ostatnim kilku dziesięcioleciu, KS zostały częściowo zastąpione przez urządzenia energoelektroniczne SVC (ang. *Static Var Compensator*) oraz STATCOM (ang. *Static Synchronous Compensator*).

Te statyczne urządzenia zapewniają stosunkowo łatwą obsługę i utrzymanie, ponieważ nie posiadają ruchomych części. Jednak obserwowane w ostatnich latach systematyczne obniżanie się mocy zwarciowej i inercji w SEE powodują istotne ograniczenia w zakresie dostarczania tych wielkości przez SVC i STATCOM, KS przechodzą kolejny renesans. Różnorodność możliwości wzmacniania stabilności SEE przez KS powodują, że obiekty te szczególnie dobrze nadają się do sprostania wielu wyzwaniom przyszłych SEE i oferują znaczną przewagę nad alternatywnymi dynamicznymi formami kompensacji mocy biernej. Ze względu na obecność elementów wirujących, KS są w stanie zapewnić dodatkową inercję, a konstrukcja oparta na maszynie synchronicznej istotnie poprawia warunki zwarciowe w SEE. Te unikalne cechy KS powodują, że już dzisiaj dla wielu OSP KS stają się pierwszym wyborem jako rozwiązanie polepszające funkcjonowanie SEE cechujących się dużym nasyceniem układami energoelektronicznymi.

KS mogą być realizowane zarówno jako nowe jednostki, jak i poprzez adaptację generatorów wycofywanych jednostek wytwórczych do roli KS [6-8]. W takim przypadku konieczna jest rekonfiguracja generatora w celu umożliwienia jego samodzielnego funkcjonowania w zakresie generacji mocy biernej indukcyjnej i pojemnościowej. Rozwiązanie to stosuje się w szczególności, gdy wymagana jest szybka dostępność KS – zwykle czas modernizacji jest krótszy niż czas wymagany na zamówienie, dostarczenie i instalację KS. Zasadniczo retrofit obejmuje trzy kluczowe kroki:

1. odłączenie turbiny i dokonanie drobnych modyfikacji mechanicznych generatora zgodnie z wymaganiami,
2. opracowanie i zainstalowanie odpowiedniego układu rozruchowego, który umożliwi pracę kompensatora na optymalnym poziomie,
3. opracowanie nowego systemu sterowania uwzględniającego kontrolę sekwencji rozruchu, systemu wzbudzenia i synchronizacji z siecią.

Do najważniejszych komponentów układu KS należą: maszyna synchroniczna, układ wzbudzenia, układ rozruchowy, transformator podwyższający napięcie, system chłodzenia oraz inne systemy pomocnicze, tak jak np. system smarowania olejem (rys. 1).

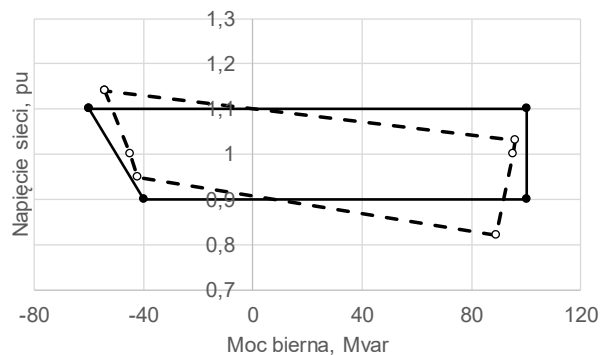


Rys. 1. Kluczowe elementy układu KS (na podstawie [5])

Głównym elementem układu KS jest maszyna synchroniczna, która z konstrukcyjnego punktu widzenia jest praktycznie tożsama z generatorem synchronicznym wykorzystywanym w konwencjonalnych jednostkach wytwórczych. Maszyna pracuje na biegu jałowym, tzn. wiruje zgodnie z częstotliwością SEE i jest odpowiednio wzbudzona w celu generacji mocy biernej. W ujęciu konstrukcyjnym, maszyny synchroniczne stosowane w KS

dzieli się na maszyny jawnobiegunowe oraz maszyny o wirniku cylindrycznym (in. maszyny o biegunach utajonych). Te pierwsze to maszyny o małej prędkości obrotowej, których maksymalna dopuszczalna prędkość obrotowa (dobierana odpowiednio do rodzaju turbiny) wynosi od 100 obr./min do 1500 obr./min. Są to maszyny, których zakres mocy biernej kształtuje się w przedziale od 500 kvar do 2000 Mvar. Maszyny o wirniku cylindrycznym to jednostki pracujące z dużymi prędkościami obrotowymi, których prędkość synchroniczna wynosi najczęściej 3000 obr./min (dla częstotliwości 50 Hz). Typowy stosowany zakres mocy biernej dla takich KS mieści się w przedziale od 20 do 200 Mvar, przy czym producenci bardzo często oferują KS o zakresie regulacji mocy biernej do 350 Mvar.

Dopuszczalny obszar pracy KS przedstawiono na rysunku 2. Obszar ten obrazuje zdolności KS do generacji mocy biernej w zależności od poziomu napięcia w SEE. Z uwagi na współpracę KS z transformatorem podwyższającym napięcie na wyjściu KS otrzymuje się zmodyfikowany obszar pracy z uwagi na stratę napięcia na impedancji transformatora (obszar pracy wyróżniony linią przerywaną na rys. 2).



Rys. 2. Obszar pracy układu na KS (linia ciągła) i na wyjściu transformatora podwyższającego - KS + transformator podwyższający napięcie (linia przerywana) [9]

Z uwagi na brak współpracy z turbiną napędową KS wymaga dedykowanego systemu rozruchowego. W praktyce stosowane systemy rozruchowe w KS to statyczne przetwornice częstotliwości (napęd o zmiennej częstotliwości) lub silnik rozruchowy (ang. *pony motor*).

Układ wzbudzenia KS wykorzystuje technologie podobne do tych stosowanych w konwencjonalnych maszynach synchronicznych. Generalnie, wyróżnia się systemy statyczne i bezszczotkowe. Wybór sposobu rozruchu KS niejako definiuje również wariant układu wzbudzenia. Najczęściej spotyka się współpracę układu rozruchowego w postaci statycznej przetwornicy częstotliwości i wzbudzenia statycznego lub układu rozruchowego w postaci silnika rozruchowego (*pony motor*) wraz ze wzbudzeniem bezszczotkowym [10].

Wybór wariantu systemu chłodzenia przeznaczonego do zastosowania w KS zależy m.in. od rodzaju obciążenia, zakresu mocy biernej KS oraz potrzeb klienta [5]. Najczęściej spotykanymi rozwiązaniami są układy chłodzenia powietrzem lub wodorem. Dla KS o dużej mocy (ponad 100 Mvar) chłodzenie wirnika i rdzenia stojana odbywa się z wykorzystaniem powietrza, wody oraz – choć coraz rzadziej – wodoru.

Z punktu widzenia podziału KS można wyróżnić dwa kryteria dotyczące jego konfiguracji:

- ze względu na liczbę jednostek KS,
- ze względu na wyposażenie układu w dodatkowe elementy (np. koło zamachowe).

W odniesieniu do pierwszego kryterium wyróżnia się KS zrealizowane jako instalacje jednostkowe, jednoelementowe, czyli układy, w których występuje jeden niezależny KS, oraz układy modułowe, które są przystosowane do wzajemnego łączenia z innymi jednostkami, w efekcie kilka KS może stanowić jedną całość. Układy modułowe są oparte najczęściej o maszyny o mocy nieprzekraczającej 100 Mvar. Należy podkreślić, że liczba zastosowanych KS nie ogranicza wyboru rodzaju stosowanych rozwiązań dla pozostałych komponentów układu, tzn. układów rozruchowych, wzbudzenia, chłodzenia, itp. Należy jednak pamiętać o konieczności zwielokrotnienia tych elementów w przypadku wyboru konfiguracji modułowej.

Natomiast w odniesieniu do drugiego kryterium, KS może zostać doposażony w koło zamachowe i/lub sprzęgło [9]. Zastosowanie dodatkowych elementów wiąże się w szczególności z dodatkowymi nakładami inwestycyjnymi. Dodanie koła zamachowego, czyli obracającej się dużej masy połączonej z wałem wirnika, umożliwiło zwiększenie głównych zalet i właściwości układów KS w zakresie wprowadzanej inercji – nawet pięciokrotnie [5]. W południowo-zachodniej Irlandii w hrabstwie Clare w 2022 roku zainstalowano KS o wadze 66 ton z największym kołem zamachowym na świecie o wadze 177 ton. Układ dostarcza do SEE 4000 MWs inercji [5, 11]. Drugą opcją dla układu KS jest zastosowanie sprzęgła pomiędzy turbiną i generatorem synchronicznych. Tego typu rozwiązanie jest zwykle realizowane poprzez konwersję układu generatora z turbiną gazową i daje możliwość wykorzystania układu również do produkcji mocy czynnej. W sytuacji, gdy sprzęgło jest zamknięte, maszyna synchroniczna pracuje jako jednostka wytwórcza, a w przypadku, gdy nie wymaga się generacji mocy czynnej, turbina gazowa jest wykorzystywana jedynie do synchronizacji maszyny z siecią, po której następuje otwarcie sprzęgła i zatrzymanie turbiny, a maszyna synchroniczna pozostaje w pracy jako KS.

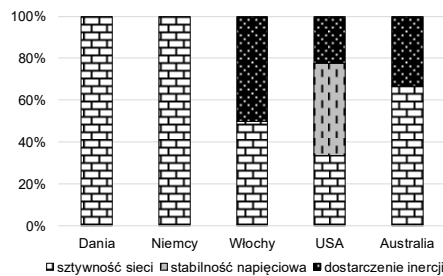
### Przegląd istniejących rozwiązań KS

Rozwój KS jest obserwowany na całym świecie. Jest to technologia interesująca dla OSP z uwagi na dobre zdolności techniczne tych urządzeń, warunkujące poprawę stabilności SEE. W KSE do tej pory nie stosowano KS podlegających OSP, jednak - jak już wcześniej wspomniano - plan rozwoju sieci przesyłowej na nadchodzące lata wskazują na potrzebę rozwoju KS zlokalizowanych w szczególności w północnej części KSE.

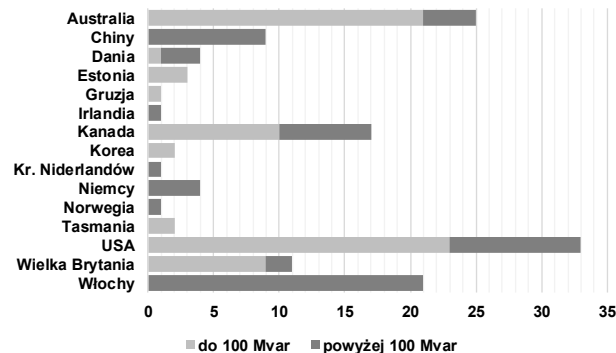
Z wykonanego przez Autorów zestawienia KS zainstalowanych na świecie - dokonano na bazie zrealizowanych studiów literaturowych [3,5,7,8,9,10,12] - wynika, że na świecie zainstalowano ok. 135 sztuk KS podlegających operatorom SEE. Do głównych motywacji podjęcia decyzji o wprowadzeniu KS do SEE zalicza się sytuacje wystąpienia zmiany w strukturach SEE zmuszające OSP do podejmowania działań w zakresie zapewnienia stabilności napięciowej - tj. dostarczenia możliwości kompensacyjnych mocy biernej, sztywności sieci oraz stabilności częstotliwościowej, czyli dostarczenia odpowiedniego poziomu inercji (patrz rys. 3). Zaznacza się, że konstrukcja i parametry KS zależą w szczególności od wymagań stawianych przez OSP oraz od stosowanej praktyki inżynierskiej w danych regionie/kraju.

Z przeprowadzonego przeglądu istniejących KS wynika, że najwięcej funkcjonujących KS występuje w Australii, Kanadzie, Chinach, Stanach Zjednoczonych, Wielkiej Brytanii i we Włoszech (rys. 4) [9,12]. Około 53% istniejących instalacji wykorzystuje KS o mocy do 100 Mvar. Najwięcej takich KS pracuje w Australii, Kanadzie,

USA oraz Wielkiej Brytanii. Zdecydowana większość instalacji (83%) występuje w konfiguracji pojedynczej jednostki KS [9].

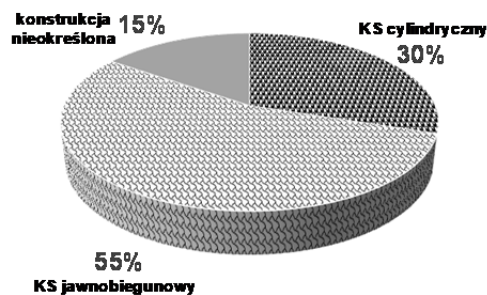


Rys. 3. Motywacja instalacji KS w wybranych krajach [12]



Rys. 4. Struktura KS na świecie w podziale na jednostki do 100 Mvar i powyżej 100 Mvar [9]

Dodatkowo zauważa się przewagę liczebną KS o konstrukcji jawnobiegunowej w porównaniu do KS o konstrukcji z biegunami utajonymi (in. maszyna cylindryczna). Zestawienie przedstawiono na rysunku 5. Spośród istniejących KS 30% stanowią maszyny cylindryczne (39 instalacji, 31 jednostek), 54% maszyny jawnobiegunowe (71 instalacji, 74 jednostki).



Rys. 5. Struktura KS w podziale na technologię wykonania maszyny synchronicznej [9]

Zakresy mocy biernej dostępnej dla poszczególnych KS przedstawiono w tabeli 2. Porównując wyznaczone średnie zakresy dostępnej mocy biernej zauważa się, że KS jawnobiegunowe to zwykle układy o małej mocy, do 100 Mvar, Natomiast KS cylindryczne charakteryzują się najczęściej szerszymi zakresami regulacji mocy biernej.

Tabela 2. Zakresy mocy biernej w Mvar dla KS w dwóch technologiach wykonania [9, 12]

Zakres	Maszyna jawnobiegunowa		Maszyna cylindryczna	
	-	+	-	+
Minimalny	-5	5	-39	50
Średni	-42	76	-116	221
Maksymalny	-310	560	-280	450

(-) niedowzbudzenie, (+) przewzbudzenie

Średni zakres mocy biernej dostępnej z wszystkich istniejących KS wynosi (-79 ÷ +143) Mvar, przy czym w podziale na poszczególne kraje można wyróżnić dwie tendencje: w Australii, Estonii, Kanadzie, Wielkiej Brytanii i Stanach Zjednoczonych dominują KS o mocach do 100 Mvar, natomiast w Chinach, Danii, Włoszech (rys. 4), Niemczech dominują KS o mocach od 100 Mvar. Zatem w Europie kontynentalnej spotyka się przede wszystkim układy o dużych mocach – powyżej 100 Mvar.

Średni zakres wsparcia KS w kształtowaniu mocy zwarciowej w punkcie przyłączenia to 940 MVA dla układu z maszyną o biegunach utajonych i 309 MVA dla układu z maszyną jawnobiegunową. Rozważając pojedyncze rozwiązania KS zauważono, że KS z maszyną o biegunach utajonych zapewnia większe moce zwarciowe niż KS z maszyną jawnobiegunową (tab. 3). Analogiczna zależność zachodzi dla wprowadzanej inercji do SEE przez KS wykonane w dwóch różnych technologiach (tab. 4). Inercję KS można oszacować zgodnie z zależnością (1):

$$(1) \quad H_{S,t} = \frac{\sum_{i \in G_s} h_i S_{n,i} w_{i,t}}{\sum_{i \in G_s} S_{n,i} w_{i,t}},$$

gdzie:  $G_s$  – liczba generatorów synchronicznych zainstalowanych na danej instalacji SEE,  $S_{n,i}$  – moc znamionowa  $i$ -tej jednostki synchronicznej w MVA,  $w_{i,t}$  – stan pracy jednostki synchronicznej (zmienna binarna 0 lub 1)  $i$ -tej jednostki synchronicznej w przedziale czasowym  $t$ ,  $h_i$  – stała bezwładności mas wirujących  $i$ -tej maszyny synchronicznej w s, zgodnie z zależnością (2):

$$(2) \quad h_i = \frac{1}{2} \frac{J_i \omega_0^2}{S_b},$$

gdzie:  $J_i$  – moment bezwładności  $i$ -tego wirnika KS,  $\omega_0$  – prędkość kątowna w rad/s,  $S_b$  – moc znamionowa maszyny podana na tabliczce znamionowej.

Tabela 3. Zakresy mocy zwarciowej  $S_{zw}$  w MVA w zależności od technologii wykonania maszyny w KS [9]

Zakres $S_{zw}$	Maszyna jawnobiegunowa	Maszyna cylindryczna
Minimalny	36	250
Średni	309	940
Maksymalny	539	1277

Tabela 4. Zakresy wprowadzanej przez KS inercji  $H$  w MWs w zależności od technologii wykonania maszyny [9]

Zakres $H$	Maszyna jawnobiegunowa	Maszyna cylindryczna
Minimalny	7,5	80
Średni	160	1111
Maksymalny	750	4000

KS o dużej bezwładności (z kołami zamachowymi) stosuje się w celu zmniejszenia rozmiaru maszyny synchronicznej lub liczby kompensatorów wymaganych do instalacji, np. z powodu niewielkiego prawdopodobieństwa utraty stabilności częstotliwościowej SEE. Zwiększenie bezwładności KS można uzyskać poprzez zwiększenie masy wirującej maszyny. W praktyce często odbywa się to poprzez dodanie koła zamachowego do KS.

### Podsumowanie

W niniejszy artykule zawarto charakterystykę wyników zrealizowanego szerokiego przeglądu rozwiązań KS stosowanych na świecie.

Na świecie stosuje się zarówno nowe KS, jak i KS uzyskane poprzez retrofit, przy czym obserwuje się, że dominującą tendencją u innych OSP jest instalowanie nowych układów jako rozwiązanie rekomendowane.

Obserwowana transformacja SEE, w tym zmiana struktury sektora wytwórczego, powoduje dynamiczny wzrost zainteresowania KS. Do głównych czynników decydujących o zainteresowaniu instalacją tych urządzeń przez operatorów zalicza się:

- poprawę stabilności napięciowej SEE, poprzez dynamiczną regulację napięcia i kompensację mocy biernej;
- poprawę sztywności SEE, w tym:
  - o wzrost mocy zwarciowej;
  - o poprawę sztywności napięcia w sieci;
- poprawę stabilności częstotliwościowej SEE, poprzez zwiększenie inercji i ograniczenie dynamiki zmian częstotliwości w stanach zakłóceńowych.

Cechy te w praktyce powodują że poprzez instalację KS często osiąga się: zwiększenie stabilności SEE. Dlatego KS zwykle instaluje się w SEE, w których wycofanie konwencjonalnych jednostek wytwórczych wywołuje problemy ze stabilnością ich pracy

**Autorzy:** dr inż. Agnieszka Dziendziel, Specjalista ds. BiR w PSE Innowacje, Asystent w Politechnice Śląskiej, E-mail: agnieszka.dziendziel@pse.pl; dr inż. Piotr Rzepka, Ekspert ds. BiR w PSE Innowacje, Adiunkt w Politechnice Śląskiej, E-mail: piotr.rzepka@pse.pl; dr inż. Mateusz Szabliski, Ekspert ds. BiR w PSE Innowacje, Adiunkt w Politechnice Śląskiej, E-mail: mateusz.szabliski@pse.pl. PSE Innowacje sp. z o. o., Al. Jerozolimskie 132, 02-305 Warszawa, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

### LITERATURA

- [1] Raport pt. The Ten-Year Network Development Plan – Analiza potrzeb systemu europejskiego. Dostęp on-line: www.entsoe.eu/publications/tyndp (08.05.2023 r.)
- [2] Plan rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2023-2032. Opracowanie PSE S.A., Konstancin-Jeziorna, listopad 2022
- [3] Payerl C., Introduction to ABB Synchronous Condenser offering A solution to improve grid strength, *ABB MOTORS AND GENERATORS*, 2020
- [4] Glinka T., Generatory synchroniczne jako kompensatory mocy biernej i filtry wyższych harmonicznnych, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr 1/2013 (98)
- [5] Strona internetowa Siemens Energy [www.siemens-energy.com](http://www.siemens-energy.com)
- [6] Krok R., Propozycja wykorzystania odstawianych generatorów TGH-120 do kompensacji mocy biernej, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* Nr 67
- [7] Dokument EPRI (European Power Research Institute) Turbine-Generator Topics for Power Plant Engineers Converting a Synchronous Generator for Operation as a Synchronous Condenser, marzec 2014
- [8] Materiały z sesji CIGRE edycja 2022: Tutorial Synchronous Condenser Specifications
- [9] Broszura Techniczna A1/C4 nr referencyjny 885, Guide on the Assessment, Specification and Design of Synchronous Condenser for Power System with Predominance of Low or Zero Inertia Generators, listopad 2022
- [10] Brian Gemmell, Kai-Uwe Paeselt: Synchronous condenser solutions, *ERCOT Stakeholder Meeting*, 15 listopada 2013 r.
- [11] Strona internetowa Energy for generations. Dostęp <https://esb.ie/media-centre-news/press-releases/article/2022/11/04/minister-ryan-welcomes-esb-s-50m-investment-in-synchronous-compensator-at-moneypoint> (08.05.2023 r.)
- [12] Opracowanie PHOENIX International Review z dnia 30 października 2019, opracowany przez następujące podmioty: Energy Network, University of Strathclyde Engineering, ABB, National Grid, DTU