

# METODA ANALIZY NIEZAWODNOŚCI UKŁADÓW ROZDZIELCZYCH ŚREDNICH NAPIĘĆ

dr inż. Joachim Bargiel / Politechnika Śląska  
prof. dr hab. inż. Paweł Sowa / Politechnika Śląska  
mgr inż. Katarzyna Zając / Politechnika Śląska  
mgr inż. Tomasz Sierociński / TAURON Dystrybucja GZE S.A.

## 1. STAN ISTNIEJĄCY SIECI ŚREDNICH NAPIĘĆ

Sieć rozdzielcza SN jest siecią napowietrzną lub kablową, rzadziej napowietrzno-kablową, zasilana ona rejonami zróżnicowanymi, obejmującymi miasta, przedmieścia i wioski oraz tereny przemysłowe. To bardzo liczni odbiorcy, z reguły o małej mocy, pobierający energię bezpośrednio z sieci średniego napięcia, ale również odbiorcy operujący na niskim napięciu, zasilani grupowo z transformatorów SN/nN, które tworzą odbiór transformatorowy SN/0,4 kV – zwany ogólnie odbiorcą grupowym. Sieć ta pracuje jako sieć promieniowa. Poszczególne wydzielone „promienie” są rozbudowanymi gałęziami. Gałąź zasilana jest zwykle w jednym punkcie (węźle sieciowym) z sieci nadrzędnej 110 kV. W stanach poawaryjnych dyspozytor (operator) ma możliwość przełączenia części odbiorców na zasilanie rezerwowe z sąsiednich gałęzi („promieni”) sieci SN, w kilku (od 2 do 5) – z góry przygotowanych – punktach położonych wewnątrz niej.

Źródłami zasilania sieci elektroenergetycznych średnich napięć (SN) są węzły sieci 110 kV, zasilane z sieci przesyłowych i dużych elektrowni oraz lokalne źródła energii elektrycznej, tzw. generacja lokalna. Lokalne źródła, położone głęboko wewnątrz sieci rozdzielczych średnich i niskich napięć, stwarzają nowe sytuacje współpracy z siecią energetyki w stanach normalnych i poawaryjnych oraz pracy wyspowej. W wielu przypadkach są to źródła drobne, obiektowe (urzędy, szpitale, szkoły, pływalnie, centra energetyczne gmin).

Obecny stan terenowych sieci elektroenergetycznych średniego napięcia jest niezadowolający, pomimo wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną przede wszystkim wśród odbiorców zasilanych z tych sieci. Znaczący udział w tym wzroście mają odbiorcy bytowo-komunalni, rolnictwo, drobny przemysł oraz usługi. Zwiększenie poboru mocy i energii wymusza rozwój tej sieci przez budowę nowych linii i stacji SN/nN. Wymagane są więc relatywnie większe nakłady na rozwój sieci. Jednak z uwagi na obecną strukturę sieci terenowych, rozproszenie punktów odbioru na terenach wiejskich, długości ciągów liniowych bez możliwości drugostronnego ich zasilania w stanach awaryjnych, przebudowa najbardziej zużytych fizycznie i najmniej sprawnych sieci nie może być szybka ani też wzorowana na sieciach miejskich. Powinna być poprzedzona pracami badawczymi w celu ustalenia realnych i ekonomicznie uzasadnionych kierunków zmian stanu istniejącego.

## 2. MODEL NIEZAWODNOŚCIOWY DLA SIECI ROZDZIELCZYCH ŚREDNICH NAPIĘĆ

Z punktu widzenia niezawodności od sieci wymaga się ciągłej dostawy energii elektrycznej o odpowiedniej jakości, do każdego węzła odbiorczego, w określonych okresach czasu. Wrażliwość odbiorców na zakłócenia dostawy energii elektrycznej określają następujące parametry:

- czas pojedynczej przerwy zasilania, w tym bardzo istotny jest tzw. czas dopuszczalnej przerwy zasilania, po przekroczeniu którego skutki przerwy stają się znaczące dla odbiorcy (szkody gospodarcze)

### Streszczenie

*W artykule przedstawiono jedną z najbardziej aktualnych metod i program obliczeniowy do oceny niezawodności zasilania odbiorców z sieci średnich napięć w kraju. Jest to rozszerzenie metody i programu NIEZ,*

*opracowanych w IESU dla sieci przesyłowej WN i 110 kV. Przedstawiono główne założenia metody oraz modelu obliczeniowego, a także przykładowe wyniki obliczeń dla modelowego fragmentu sieci średniego napięcia.*



- sumaryczny czas trwania przerw w analizowanym okresie (zwykle okres jednego roku)
- sumaryczna liczba przerw w analizowanym okresie
- sumaryczna liczba przerw o czasie przekraczającym dopuszczalną wartość czasu.

Wynikają stąd różne wskaźniki niezawodności zasilania.

Zakłócenia powstające w sieci elektroenergetycznej mogą spowodować pozbawienie zasilania niektórych stacji odbiorczych, na skutek przerywania ich połączeń ze stacjami zasilającymi. Mówi się wówczas o losowych, nieoczekiwanych przerwach w zasilaniu. Wystąpienie przerw zależy jest od topologicznego układu pracy sieci, a sposób i szybkość likwidacji związane są z konfiguracją układu, wyposażeniem w urządzenia rozdzielcze i automatykę sieciową oraz sposobem działania obsługi. W sieci pracującej w układzie promieniowym, jednostronnie zasilanym – oprócz nielicznych układów sieci posiadających lokalne źródła – praktycznie każde zakłócenie prowadzi do wyłączenia odbiorców. Wszystkie zakłócenia likwidowane są przez odpowiednią naprawę, mianowicie:

- samoistną, wskutek działania automatyki układ powraca do stanu wyjściowego, np.: SPZ, lub do układu zastępczego przy automatycznym SZR
- dokonaną przez obsługę i polegającą na:
  - a) przetłączeniu ręcznym na inne zasilanie rezerwowe (drogę zasilania) z jednoczesną wymianą elementu lub naprawą poawaryjną w celu skrócenia przerwy zasilania węzła – jeżeli jest to możliwe
  - b) poawaryjnej naprawie elementu w miejscu zainstalowania
  - c) wymianie elementu uszkodzonego.

W sieci prowadzone są planowe prace profilaktyczne (konserwacyjne, przeglądy i planowe remonty), przeciwdziałające przypadkom utraty działania elementów układu. Istotne są te prace, które wiążą się z koniecznością wyłączenia elementu, co prowadzi do osłabienia układu lub do wyłączenia węzłów odbiorczych, tzw. zapowiedziane wyłączenia odbiorców i muszą być odwzorowane w modelu.

Źródła generacji lokalnej rozmieszczone wewnątrz sieci średniego napięcia mogą przyczynić się do skrócenia przerw w zasilaniu odbiorców, jak i do zmniejszenia wyłączanej mocy w czasie wykonywanych prac planowych, a także w czasie przerw awaryjnych. Z punktu widzenia niezawodności zasilania odbiorców (także stacji odbiorczych SN/nN), w przypadku utraty podstawowej drogi zasilania istnieje możliwość pokrycia zapotrzebowania z generacji lokalnej. Jest to możliwe wtedy, kiedy nastąpi wydzielenie uszkodzonego odcinka sieci i zasilanie pozostałych stacji „wyspowo” z generacji lokalnej.

W modelu niezawodnościowym zasilania z sieci średnich napięć uwzględnia się następujące czynniki:

- konfiguracje układu, z uwzględnieniem układu pracy sieci
- moc dyspozycyjną lokalnych źródeł wytwórczych i ich rozmieszczenie w węzłach sieci
- remonty planowe elementów sieciowych rozpatrywanej sieci
- wyposażenie sieci w automatykę i telesterowanie oraz wpływ automatyki sieciowej
- wpływ działań dyspozytora w stanach normalnych i awaryjnych oraz działania obsługi.

W celu rozwiązania postawionego zagadnienia istniejąca sieć SN została podzielona na promienie zasilane w jednym punkcie z głównego punktu zasilającego, tworząc gałęzie. Wewnątrz gałęzi są łączniki samoczynne, zdalnie sterowane oraz lokalne źródła. W zależności od lokalizacji łączników samoczynnych i zdalnie sterowanych, w gałęzi sieci tworzy się podział tej gałęzi na fragmenty, które są wyłączane samoczynnie lub przetłaczane w stanach zakłóceń awaryjnych lub poawaryjnych. Te fragmenty zostały nazwane elementami układu, tzw. elementami scalonymi. Wraz z tymi elementami zostaje wyłączonych lub przetłaczonych wielu odbiorców. Model ten pozwala na obliczenie dla odbiorców albo stacji odbiorczych następujących wskaźników:

$D$  – oczekiwana liczba przerw dostawy energii elektrycznej

$Q$  – wskaźnik zawodności, który jest interpretowany najczęściej jako względny czas pozostawiania układu w stanie niezdatności

$A_{nd}$  – energia niedostarczona, w MWh/a.

Można je uzupełnić wskaźnikami łatwymi do obliczenia, np.:

$t_{sr}$  – średni czas przerwy zasilania, w h/przerwę oraz innymi.

### 3. ZAŁOŻENIA MODELU NIEZAWODNOŚCIOWEGO

Sieć rozdzielcza SN składa się z wielu urządzeń, które w modelu zostały zgrupowane w następujące elementy: linie, transformatory, systemy szyn zbiorczych (stacji odbiorczych i zasilających) oraz jednostki wytwórcze. Na skutek zaistniałych w sieci zakłóceń może wystąpić nowe rozcięcie sieci na niepołączone ze sobą wycinki, w każdym wycinku mogą wystąpić następujące sytuacje:

- jeżeli w wydzielonym wycinku znajdują się tylko stacje odbiorcze, to stacje te zostaną pozbawione zasilania
- jeżeli w wydzielonym wycinku są zarówno stacje odbiorcze i zasilające, to może wystąpić:
  - pełne zasilanie stacji odbiorczych, gdy jest wystarczająca moc w stacji zasilającej
  - ograniczenie lub brak dostawy mocy dla odbiorców (w stacjach odbiorczych) w wyniku deficytu mocy w wydzielonym wycinku.

Wyróżnić tutaj należy dwa uzupełniające się zagadnienia:

- zagadnienia ciągłości zasilania stacji odbiorczych w wyniku zaistniałych zakłóceń, z uwzględnieniem przełączeń (możliwością wyszukania „nowej” drogi zasilania po zamknięciu otwartego łącznika)
- zagadnienia bilansu mocy wycinków powstałych z nowych rozcięć w wyniku zaistniałych zakłóceń i wynikające z tego:
  - zbilansowanie mocy i odbiorcy nie odczuwają skutków
  - niezbilansowanie mocy i występują ograniczenia.

Rozwiązanie obu zagadnień wymaga algorytmu, który będzie wyszukiwał stany pracy sieci, prowadzące do omówionych wyżej sytuacji. Ze względu na złożoność zagadnienia i praktycznych możliwości wprowadzono następujące uproszczenia:

- odwzorowanie mocy dyspozycyjnej źródła przez średnią dyspozycyjną
- obciążenie szczytowe stacji odbiorczych traktowane w sposób deterministyczny
- źródło wytwórcze pracujące autonomicznie; sprawdza się warunek, że moc dyspozycyjna jest większa lub równa mocy zapotrzebowanej wydzielonego obszaru i zapewniona jest płynna regulacja wytwarzanej mocy, skorelowana z wypadkową charakterystyką częstotliwościową zapotrzebowania odbiorców
- remonty urządzeń sieciowych traktuje się deterministycznie
- pomija się zjawiska towarzyszące stanom niestabilności.

### 4. CHARAKTERYSTYKA POSZCZEGÓLNYCH ETAPÓW ANALIZY NIEZAWODNOŚCI ZASILANIA ODBIORCÓW

Analiza niezawodności zasilania odbiorców z określonej sieci średniego napięcia wymaga podjęcia działań w czterech etapach:

#### **Etap 1: Analiza układu połączeń elementów sieci rozdzielczej – ustalenie struktury sieci analizowanego układu**

Podstawowym algorytmem składowym jest algorytm wyznaczania drogi zasilania. Jego zadaniem jest wyznaczenie elementów grafu sieci, które łączą węzeł odbiorczy (analizowany) z węzłem zasilającym. Ustalenie struktury sieci analizowanego układu wymaga:

- a) sporządzenia tablicy dróg zasilających badany węzeł odbiorczy ( $X_0$ )
- b) utworzenia macierzy dróg zasilających ( $Z$ ) badany węzeł odbiorczy.

#### **Etap 2: Wyznaczenie wskaźników nieciągłości zasilania rozpatrywanego węzła odbiorczego**

Wyznaczenie wskaźników niezawodności zasilania rozpatrywanego węzła odbiorczego polega na:

1. Określeniu danych statystycznych awaryjności elementów analizowanego układu sieci:

$d_i$  – częstość zakłóceń *i-tego* elementu scalonego, złożonego z urządzeń wchodzących w jego skład, tj. oczekiwana liczba wyłączeń na 100 sztuk elementów i rok

$t_i$  – średni czas trwania zakłócenia na *i-tym* elemencie układu, w godzinach na zakłócenie (h/zakł.),

2. Wyznaczeniu elementów pojedynczych oraz par trójek elementów, których wyłączenie powoduje przerwę w zasilaniu badanego węzła odbiorczego.



Wypadkowe wskaźniki niezawodności zasilania dla węzła są utworzone z:

- wskaźników własnych węzła
- wskaźników związanych z wyłączeniami pojedynczych elementów scalonych sieci
- wskaźników związanych z wyłączeniami par elementów scalonych sieci.

W obliczeniach nie są rozpatrywane wyłączenia potrójne, ponieważ prawdopodobieństwo awarii równocześnie więcej niż dwóch elementów jest bardzo małe i nie ma istotnego znaczenia w obliczeniach praktycznych.

Dla każdego węzła obliczana jest:

- oczekiwana roczna liczba przerw w zasilaniu węzła, oznaczona literą  $D$
- wskaźnik niezdatności  $Q$ , rozumiany jako względny czas wystąpienia przerwy
- oczekiwana roczna niedostarczona energia w wyniku zakłóceń, obliczana jako iloczyn energii pobieranej z węzła i wskaźnika niezdatności  $Q$ :

$$A_{nd} = Q \times A \quad (1)$$

Z powyższych wielkości można wyznaczyć średni czas trwania pojedynczej przerwy zasilania w okresie  $T$ , oznaczony literą  $t_a$  z zależności

$$t_a = \frac{Q \times T}{D} \quad (2)$$

### Etap 3: Wyznaczenie syntetycznej miary nieciągłości zasilania – energii niedostarczonej

Po przeanalizowaniu wszystkich stanów, dla zasilania danej stacji, oblicza się energię niedostarczoną  $A_{nd}$ . Dla  $i$ -tego węzła odbiorczego oblicza się ją z zależności:

$$A_{ndi} = Q_i \times A_{ri} \quad (3)$$

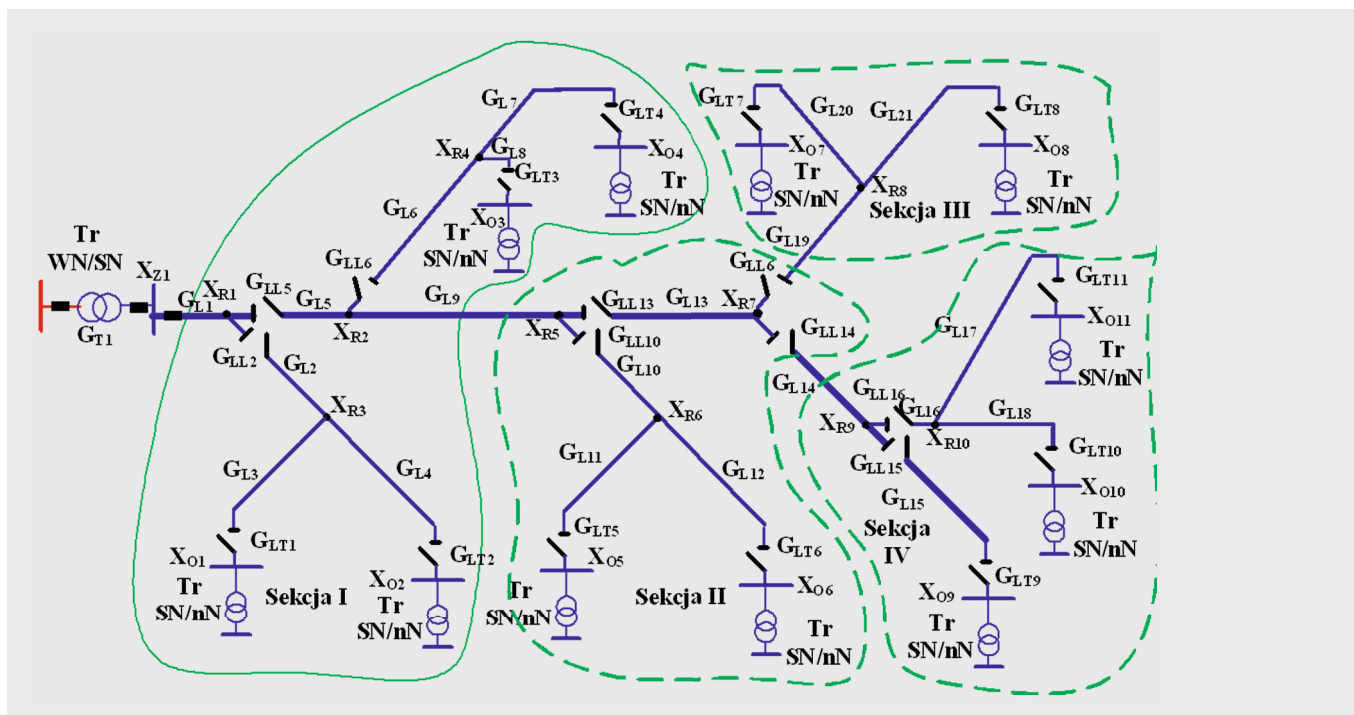
$$A_{ri} = P_{s,i} \times T_{s,i} \quad (4)$$

gdzie:

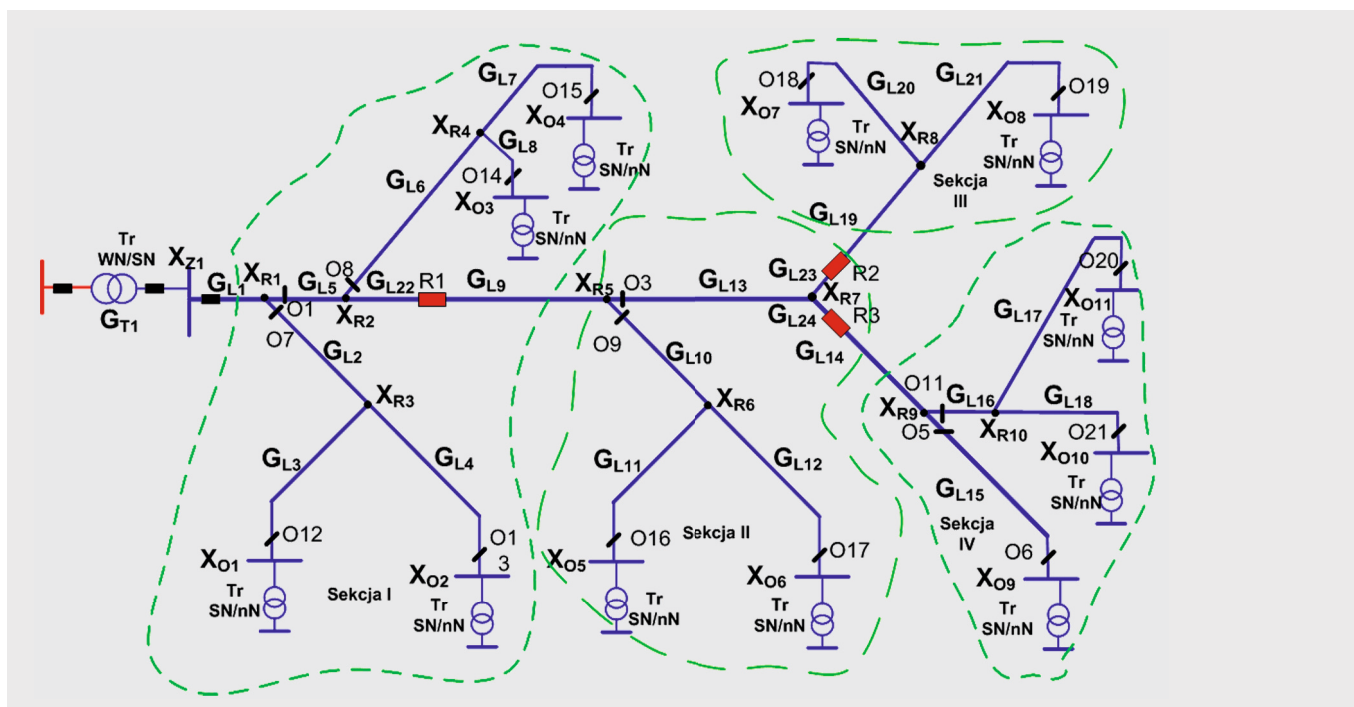
- $Q_i$  – wskaźnik zawodności obliczony dla  $i$ -tego węzła
- $A_{ri}$  – energia roczna pobierana przez  $i$ -ty węzeł
- $P_{s,i}$  – moc średnia pobierana przez  $i$ -ty węzeł
- $T_{s,i}$  – czas użytkowania obciążenia średniego.

### Etap 4: Analiza wyników i wybór wariantu

Przykładowe obliczenia niezawodności zasilania wykonano dla modelowej sieci elektroenergetycznej średniego napięcia, pokazanej na rys. 1. Obliczenia wykonano dla trzech układów (wariantów) pracy układu. W układzie pierwszym wszystkie stacje są zasilane z głównego punktu zasilania (GPZ), w linii jest zainstalowany wyłącznik, natomiast w odgałęzieniach oraz przy transformatorze SN/nN odłączniki.



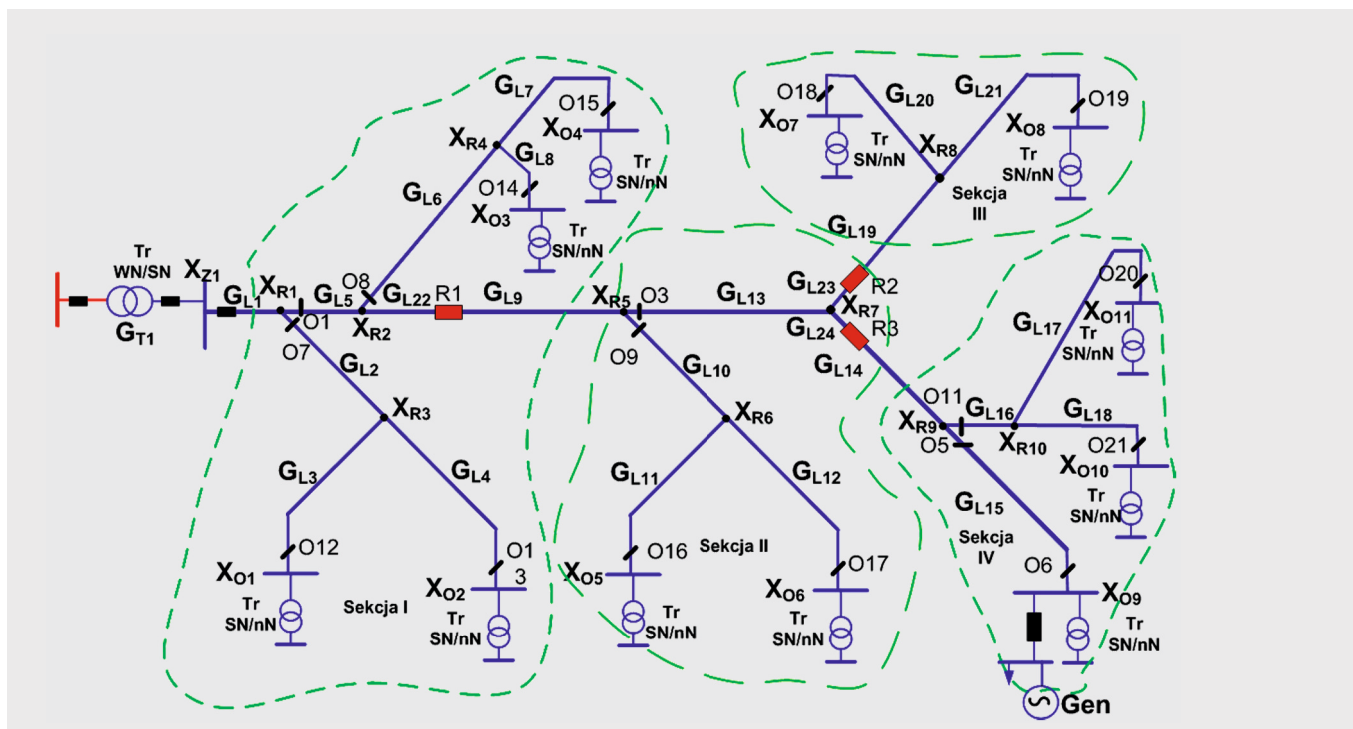
Rys. 1. Układ modelowy sieci terenowej SN – układ podstawowy



Rys. 2. Układ modelowy sieci terenowej SN – układ sieci SN z reklozernami

W układzie drugim, pokazanym na rysunku 2 wprowadzono sekcjonowanie linii głównej za pomocą wyłącznika (reklozera R1) oraz instalację reklozernów R2 i R3 w odgałęzieniach sekcji odbiorczych III i IV. Zastosowanie automatycznych wyłączników (reklozernów) umożliwiło zmniejszenie częstości zakłóceń oraz łącznego czasu trwania zakłócenia o 37% (w porównaniu z układem modelem pokazanym na rysunku 1). Liczba wyłączonych odbiorców zostaje ograniczona, a czas lokalizacji zakłócenia znacznie skrócony. Wartość niedostarczonej energii w porównaniu do stanu wyjściowego (układ 1) jest o 34% mniejsza.





Rys. 3. Układ modelowy sieci terenowej SN – układ sieci SN z reklozerni oraz generacją lokalną

W układzie trzecim wprowadzono poza sekcjonowaniem linii głównej za pomocą reklozera R1 i reklozerni R2 i R3 w odgałęzieniach sekcji odbiorczych III i IV, generację lokalną w sekcji odbiorczej IV. Przedstawiony układ umożliwia dzięki zainstalowanym reklozerni automatyczną lokalizację miejsca zwarcia, sekcjonowanie toru głównego linii oraz odcinanie uszkodzonych sekcji odbiorczych III i IV w odgałęzieniach za reklozerni R2 i R3. Natomiast obecność źródła lokalnego umożliwi zasilanie nieuszkodzonych sekcji. Dla takiego układu następuje spadek łącznego czasu przerw o 68% oraz liczby przerw, skutkuje to znacznym zmniejszeniem energii niedostarczonej do odbiorców. Wartość niedostarczonej energii w porównaniu do stanu wyjściowego (układ 1) jest o 68,5% mniejsza.

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabelicy 1.

Tab. 1. Zestawienie obliczonych wskaźników niezawodności dla poszczególnych układów

Układ 1	Numer węzła		D	Q	$T_a$	$t_{sr}$	f	P	Typ	En
Nr sekcji			zakł./a	$\cdot 10^{-4}$	h/a	h/zakł.	lat/1 zakł.	kW	odbioru	MWh/a
	węzeł 1	$X_z1$	0,5	0,37	0,3	0,7	2,04			
1	węzeł 2	$X_o1$	13,7	36,1	31,6	2,3	0,07	120	KB	3,8
	węzeł 3	$X_o2$	13,7	36,1	31,6	2,3	0,07	180	KB	5,7
	węzeł 4	$X_o3$	13,7	36,1	31,6	2,3	0,07	250	P	7,9
	węzeł 5	$X_o4$	13,7	36,1	31,6	2,3	0,07	180	KB	5,7
2	węzeł 6	$X_o5$	13,7	36,1	31,6	2,3	0,07	200	KB	6,3
	węzeł 7	$X_o6$	13,7	36,1	31,6	2,3	0,07	130	KB	4,1
3	węzeł 8	$X_o7$	13,7	36,1	31,6	2,3	0,07	340	P	10,8
	węzeł 9	$X_o8$	13,7	36,1	31,6	2,3	0,07	220	KB	7,0
4	węzeł 10	$X_o9$	13,7	36,1	31,6	2,3	0,07	450	P	14,2
	węzeł 11	$X_o10$	13,7	36,1	31,6	2,3	0,07	190	KB	6,0
	węzeł 12	$X_o11$	13,7	36,1	31,6	2,3	0,07	190	KB	6,0
									suma	77,5

Układ 2		D	Q	$T_a$	$t_{sr}$	f	P	Typ	En	
Nr sekcji	Numer węzła	zakł./a	$\cdot 10^{-4}$ -	h/a	h/zakł.	lat/1 zakł.	kW	odbioru	MWh/a	
	węzeł 1	$X_z1$	0,5	0,4	0,3	0,7	2,0			
1	węzeł 2	$X_o1$	5,7	14,6	12,8	2,2	0,17	120	KB	1,5
	węzeł 3	$X_o2$	5,7	14,6	12,8	2,2	0,17	180	KB	2,3
	węzeł 4	$X_o3$	5,7	14,6	12,8	2,2	0,17	250	P	3,2
	węzeł 5	$X_o4$	5,7	14,6	12,8	2,2	0,17	180	KB	2,3
2	węzeł 6	$X_o5$	8,9	23,2	20,4	2,3	0,11	200	KB	4,1
	węzeł 7	$X_o6$	8,9	23,2	20,4	2,3	0,11	130	KB	2,6
3	węzeł 8	$X_o7$	10,1	25,4	22,2	2,2	0,1	340	P	7,6
	węzeł 9	$X_o8$	10,1	25,4	22,2	2,2	0,1	220	KB	4,9
4	węzeł 10	$X_o9$	12,5	31,2	27,3	2,2	0,08	450	P	12,3
	węzeł 11	$X_o10$	12,5	31,2	27,3	2,2	0,08	190	KB	5,2
	węzeł 12	$X_o11$	12,5	31,2	27,3	2,2	0,08	190	KB	5,2
								suma	51,1	

Układ 3		D	Q	$T_a$	$t_{sr}$	f	P	Typ	En	
Nr sekcji	N węzła	zakł./a	$\cdot 10^{-4}$ -	h/a	h/zakł.	lat/1 zakł.	kW	odbioru	MWh/a	
	węzeł 1	$X_z1$	0,5	0,4	0,3	0,7	2,0			
1	węzeł 2	$X_o1$	5,3	14,2	12,4	2,4	0,19	120	KB	1,5
	węzeł 3	$X_o2$	5,3	14,2	12,4	2,4	0,19	180	KB	2,2
	węzeł 4	$X_o3$	5,3	14,2	12,4	2,4	0,19	250	P	3,1
	węzeł 5	$X_o4$	5,3	14,2	12,4	2,4	0,19	180	KB	2,2
2	węzeł 6	$X_o5$	3,5	8,7	7,6	2,2	0,28	200	KB	1,5
	węzeł 7	$X_o6$	3,5	8,7	7,6	2,2	0,28	130	KB	1,0
3	węzeł 8	$X_o7$	4,7	11,9	10,5	2,2	0,21	340	P	3,6
	węzeł 9	$X_o8$	4,7	11,9	10,5	2,2	0,21	220	KB	2,3
4	węzeł 10	$X_o9$	4,0	9,6	8,4	2,1	0,25	450	P	3,8
	węzeł 11	$X_o10$	4,0	9,6	8,4	2,1	0,25	190	KB	1,6
	węzeł 12	$X_o11$	4,0	9,6	8,4	2,1	0,25	190	KB	1,6
								suma	24,4	

Z przedstawionych obliczeń wynika, że zainstalowanie samoczynnych wyłączników – reklozerów, wykonywanych do zdalnej konfiguracji sieci, oraz możliwość pracy autonomicznej źródeł lokalnych energii elektrycznej w znacznej mierze mogą przyczynić się do skrócenia przerw w zasilaniu odbiorców, jak i do zmniejszenia wyłączanej mocy w czasie wykonywanych prac planowych, a także w czasie przerw awaryjnych.

## 5. PODSUMOWANIE

Opracowanie modelu i programu obliczania podstawowych wskaźników do oceny niezawodności zasilania odbiorców z sieci średnich napięć jest koniecznym elementem. Wynika to głównie ze wzrastającej liczby lokalnych źródeł wytwórczych, mających zdecydowany wpływ na niezawodność zasilania z sieci średnich napięć. Publikacja niniejsza przedstawia końcowy etap prac nad zagadnieniem przystosowania metody i programu NIEZ, funkcjonującego w obszarze sieci przesyłowych i rozdzielczych wysokiego napięcia.



## BIBLIOGRAFIA

1. Bargiel J., Goc W., Teichman B., Średniookresowy deficyt energii elektrycznej – horyzont sezonowy, Projekt badawczy zamawiany nr PBZ-MEIN-1/2/2006 „Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju”, Gliwice, 2008.
2. Bargiel J., Goc W., Sowa P., Teichman B., Średniookresowy deficyt mocy i energii elektrycznej, Konferencja Naukowa „Rynek Energii '09”, Kazimierz Dolny, czerwiec 2009.
3. Bargiel J., Goc W., Sowa P., Teichman B., Sierociński T., Ryzyko awarii w lokalnych systemach rozdzielczych, Konferencja naukowa „Blackout”, Poznań 2010.
4. Bargiel J., Goc W., Sowa P., Teichman B., Niezawodność zasilania odbiorców z sieci średniego napięcia, Konferencja Naukowo-Techniczna „Rynek Energii '10”, Kazimierz Dolny, czerwiec 2010.