

## METODYKA OCENY WARIANTÓW ROZBUDOWY SIECI DYSTRYBUCYJNYCH SN Z UWZGLĘDNIENIEM ANALIZ NIEZAWODNOŚCI PRACY SIECI

Mikołaj CZERWONKA, Andrzej KĄKOL, Jan SMOTER

Instytut Energetyki Oddział Gdańsk

tel.: 58 349 8132 e-mail: m.czerwonka@ien.gda.pl, a.kakol@ien.gda.pl, j.smoter@ien.gda.pl

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano algorytm postępowania przy wyszukiwaniu zbioru najefektywniejszych inwestycji w sieciach średnich napięć (SN). Inwestycje są wybierane w celu ograniczenia liczby i czasu trwania przerw w zasilaniu oraz eliminacji lub ograniczenia istniejących lub przyszłych zagrożeń napięciowych i obciążeniowych. Rozpatrywane są inwestycje sieciowe w postaci budowy nowych punktów redukcyjnych, budowy nowych elementów sieciowych SN, modernizacji istniejących obiektów czy zastosowania technologii teleinformatycznych do zwiększenia obserwowalności i sterowalności pracy sieci SN.

Niniejsza praca to efekt doświadczeń Instytutu Energetyki przy realizacji koncepcji rozwoju sieci SN dla jednego z operatorów systemu dystrybucyjnego (OSD).

**Słowa kluczowe:** Sieci dystrybucyjne SN. Koncepcja rozwoju. Niezawodność.

### 1. INFORMACJE OGÓLNE

#### 1.1. Prezentacja problemu

Zasady oceny działalności OSD zostały zdefiniowane w regulacji jakościowej [1]. W dokumencie tym zobligowano OSD do ograniczenia częstości występowania i czasu trwania przerw w dostawie energii elektrycznej dla odbiorców końcowych, czyli do obniżenia wartości wskaźników SAIFI i SAIDI wyliczanych dla przerw długich i bardzo długich. Sposób wyznaczania tych wskaźników podano poniżej [2]:

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^Z N_i}{N_T} \left[ \frac{1}{rok} \right] \quad (1)$$

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^Z T_i \cdot N_i}{N_T} \left[ \frac{min}{rok} \right] \quad (2)$$

gdzie: SAIFI – średnia systemowa częstość występowania przerw długich i bardzo długich w dostawach energii elektrycznej, SAIDI – średni systemowy czas trwania przerw długiej i bardzo długiej w dostawach energii elektrycznej,  $N_i, T_i$  – liczba odbiorców pozbawionych zasilania i czas trwania  $i$ -tej przerwy w zasilaniu,  $N_T$  – sumaryczna liczba odbiorców energii elektrycznej,  $Z$  – liczba długich i bardzo długich przerw w zasilaniu.

Wraz z wprowadzeniem regulacji jakościowej został wprowadzony wymóg systematycznego obniżania

wskaźników ciągłości zasilania. Niedotrzymanie (przekroczenie) wartości referencyjnych będzie skutkowało naliczeniem kar finansowych dla OSD. W rezultacie wzrosło zaangażowanie OSD w opracowanie koncepcji rozwoju systemu dystrybucyjnego wraz z analizą niezawodności pracy sieci. Rozmiar modelu, zakres prac oraz ilość wariantów analizowanych w koncepcjach rozwoju sieci wpływają na znaczące nakłady pracy niezbędne do przygotowania modeli obliczeniowych, przeprowadzenia symulacji i ocenę wyników. Opracowanie planów rozbudowy sieci wymaga przygotowania następujących modeli obliczeniowych:

- model do obliczeń rozptylowych (R),
- model do obliczeń zwarciovych (Z),
- model do obliczeń niezawodnościowych (N).

Inwestycje proponowane w celu zmniejszenia zagrożeń w jednym z modeli, mają wpływ na wyniki otrzymane w pozostałych modelach. W związku z tym wskazane jest opracowanie metodyki przeprowadzania badań symulacyjnych i syntezy otrzymanych z różnych modeli wyników w taki sposób, aby proponowany zestaw inwestycji sieciowych był zestawem najefektywniejszym.

#### 1.2. Założenia dla procedury badawczej

Poniżej zaprezentowano założenia do opracowania procedury planowania i rozbudowy sieci SN. Procedura ta charakteryzuje się uniwersalnością i może zostać przeprowadzona dla dowolnego fragmentu sieci SN. Główne cechy procedury to:

- skoordynowanie planów rozbudowy sieci elektroenergetycznej z działaniami zmierzającymi do zwiększenia obserwowalności i sterowalności pracy sieci dystrybucyjnej,
- wykorzystanie rocznych profili zapotrzebowania ze stacji SN/nn do wyznaczenia charakterystycznych wartości obciążeń,
- wykorzystanie danych o niezawodności pracy sieci elementów sieciowych i uwzględnieniu czynnika starzeniowego, tj. wzrostu awaryjności elementów w modelach obliczeniowych dla analizowanych kolejnych horyzontów czasowych,
- uwzględnienie liczby odbiorców przyłączonych do sieci po stronie napięcia niskiego stacji transformatorowej SN/nn wraz z ich mocą przyłączeniową,
- uwzględnieniu rozwoju generacji rozproszonej w sieciach SN i nn,

- szeregowaniu pod kątem efektywności proponowanych inwestycji sieciowych z uwzględnieniem ich lokalnego i globalnego wpływu na poprawę niezawodności pracy sieci elektroenergetycznej,
- przeprowadzeniu analiz optymalizacyjnych w zakresie doboru punktów podziału sieci i instalacji łączników zdalnie sterowalnych.

## 2. MODELOWANIE

### 2.1. Zakres analiz

Do przygotowania koncepcji rozbudowy sieci SN są przeprowadzane następujące analizy:

- analizy rozptyłowe do oceny napięć i obciążeń w stanach podstawowych i awaryjnych.
- analiza zwarciova i ocena wytrzymałości zwarciovej aparatury pierwotnej z uwzględnieniem planów rozbudowy sieci WN i NN oraz rozwojem generacji rozproszonej.
- analizy niezawodności pracy sieci elektroenergetycznej celem (1) identyfikacji obszarów o obniżonej pewności zasilania oraz (2) rozmieszczenia łączników zdalnie sterowanych.

W zależności od typu przeprowadzanych analiz, wpływ na wyniki mają różne czynniki, natomiast wspólna jest struktura sieci. Badania symulacyjne są przeprowadzane dla wskazanego przez OSD horyzontu czasowego (+15, +20 lat). Stąd, w modelu należy odzworować:

- wartość zapotrzebowania:
  - bieżąca zmienność zapotrzebowania,
  - prognozowana zmienność zapotrzebowania;
- generacja:
  - generacja istniejąca,
  - generacja prognozowana,
  - zmienność dobową, zmienność sezonową generacji;
- awaryjność pracy sieci elektroenergetycznej:
  - awaryjność poszczególnych elementów sieci,
  - szybkość działania pogotowia energetycznego,
  - czasy napraw,
  - efekt starzenia elementów sieci SN;
- planowane inwestycje w sieci SN i WN.

Sposób uwzględnienia powyższych danych w modelu jest uzależniony od oczekiwań OSD i od dostępności danych. Konieczne jest m.in. zdefiniowanie założeń w zakresie uwzględnianej generacji i jednoczesności jej występowania. Proponowane rozstrzygnięcie zamieszczono w [3]. Prezentowane tam założenia to urealnienie warunków, przy których są przeprowadzane obliczenia rozptyłowe na potrzeby wyznaczenia zbioru inwestycji sieciowych.

Ostatnią grupą analiz są:

- analizy ekonomiczne,
- szacowanie efektywności inwestycji.

### 2.2. Kryteria oceny

Poniżej wskazano parametry (wskaźniki), które zostały wykorzystane do oceny pracy sieci elektroenergetycznej i uwzględnione w proponowanym algorytmie.

1. Wartości napięć w zakresie napięć dopuszczalnych w sieci SN, tj.  $0,9 \cdot U_n \leq U_i \leq 1,1 \cdot U_n$ .
2. Wartości obciążeń nie większe niż wartości dopuszczalne długotrwałe.
3. Zachowanie wytrzymałości zwarciovej.
4. Wskaźnik SAIFI – wzór (1).
5. Wskaźnik SAIDI – wzór (2).

Kryteria napięciowe i obciążeniowe muszą być spełnione we wszystkich modelach zapotrzebowania

i generacji podczas pracy w układzie normalnym. W takim układzie pracy są wyszukiwane inwestycje przeznaczone do eliminacji zidentyfikowanych zagrożeń. Dla stanów  $n-1$  sporządzany jest wykaz przekroczeń dopuszczalnych napięć i obciążeń, jednak nie jest on wyznacznikiem inwestycji, dopóki w układzie pracy bez wyłączeń będą występowały przekroczenia.

Kryteria 1-5 (podpunkt 2.2) są wykorzystywane do oceny warunków pracy sieci, a dla zidentyfikowanych zagrożeń są proponowane inwestycje sieciowe. Inwestycje te, poza eliminacją zagrożeń obciążeniowych i napięciowych mają wpływ na SAIDI i SAIFI. Osobną grupę inwestycji tworzą inwestycje dedykowane poprawie ciągłości zasilania. Do oceny tych inwestycji zdefiniowano parametry 6 i 7 poniżej.

6. Koszt realizacji inwestycji sieciowej – koszty inwestycyjne i eksploatacyjne instalacji  $K_n$ .

7. Wskaźnik efektywności inwestycji [3]

$$V_{n \in N} \gamma_n = \frac{K_n}{SAIDI_n - SAIDI_{ref}} \left[ \frac{PLN}{min} \right] \quad (3)$$

gdzie:  $n$ -ta inwestycja ze zbioru  $N$  inwestycji,  $SAIDI_{ref}$  – wartość wskaźnika wyznaczona w modelu odniesienia,  $SAIDI_n$  – wartość wskaźnika wyznaczona przy uwzględnieniu wskazanej inwestycji.

### 2.3. Analiza niezawodności pracy sieci

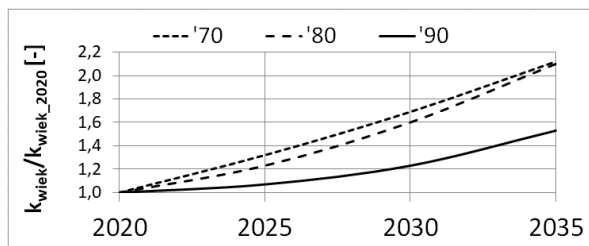
Podatność elementu na uszkodzenia jest uzależniona od jego wieku, stanu czy warunków eksploatacji [3]. Stąd, do wyznaczenia intensywności uszkodzeń elementu sieci zastosowano wzór (4).

$$\lambda_j = \lambda_{typu} \cdot k_{stan} \cdot k_{teren} \cdot k_{wiek} \quad (4)$$

gdzie:  $\lambda_j$  –intensywność uszkodzeń  $j$ -tej gałęzi,  $\lambda_{typu}$  –intensywność uszkodzeń typu (linia napowietrzna, kablowa, rodzaj izolacji),  $k_{stan}$ ,  $k_{teren}$ ,  $k_{wiek}$  – współczynniki korygujące.

Wskaźniki intensywności uszkodzeń zostały uzależnione m.in. od wieku elementu. Jest to o tyle uzasadnione, że istniejące sieci SN są w znacznej mierze w wieku powyżej 30 lat [4]. Po uwzględnieniu horyzontu czasowego obliczeń (15-20 lat), projektowany czas eksploatacji tych linii zostanie przekroczony, ich awaryjność wzrośnie znacząco. Założono, że awaryjność linii napowietrznych i kablowych w okresie początkowym jest stała, natomiast wraz z czasem eksploatacji – zwiększa się. Trendy zmian awaryjności elementów sieciowych, linii napowietrznych z lat 70, 80 i 90 w kolejnych modelach obliczeniowych zostały pokazane na rysunku 1.

Doświadczenia opisywane w publikacji [5] dowodzą na zależność intensywności uszkodzeń elementów sieciowych także od obszaru (terenu), w którym są eksploatowane. Stąd obecność współczynnika  $k_{teren}$  we wzorze (4). Współczynnik  $k_{stan}$  został wprowadzony w celu uwzględnienia jakościowej oceny stanu elementu w analizach niezawodnościowych. Ocena ta dokonywana jest przez brygady techniczne podczas prac remontowych czy okresowych oblotów linii. Wartości trzech współczynników korygujących  $k$  we wzorze (4) są dobierane z wykorzystaniem danych o awaryjności zgromadzonych przez OSD na terenie modelowanym.



Rys. 1. Względne zmiany wartości współczynnika starzeniowego w modelach dla lat 2025, 2030 i 2035 [3]

### 3. KONCEPCJA

#### 3.1. Zakres analiz

Modele obliczeniowe dla celów koncepcji rozwoju sieci dystrybucyjnej SN mogą obejmować swoim zakresem różne okresy analizy. Dla potrzeb niniejszego artykułu wyszczególniono następujące modele:

- RT0 – model dla roku początkowego. Wybierany jest rok aktualny bądź taki rok, dla którego są dostępne dane pomiarowe za okres całego roku kalendarzowego.
- RTH – model dla przyjętego horyzontu czasowego (H).

Pomiędzy RT0 a RTH są przyjmowane dwa bądź trzy modele pośrednie. Liczba modeli pośrednich jest uzależniona od przyjętego horyzontu czasowego – im dłuższy horyzont czasowy, tym większa liczba modeli pośrednich.

- RT0+ – model sieci elektroenergetycznej uwzględniający inwestycje sieciowe w sieci SN będące w trakcie realizacji. Jest to model przyszłościowy, w którym wartości obciążeń i generacji uwzględniają 1) prognozowany wzrost zapotrzebowania oraz 2) zmiany wynikające z przyłączenia nowych odbiorców i nowych źródeł wytwórczych do sieci.

Definicja inwestycji w trakcie realizacji nie jest precyzyjna. Potrzebna jest ekspercka ocena, które inwestycje z bieżącego planu rozwoju uwzględnić w modelu RT0+. Uwzględniana jest realność realizacji inwestycji do roku, dla którego opracowano model RT0+.

Model RT0+ jest modelem bazowym, do weryfikacji wszelkich niezdefiniowanych inwestycji sieciowych w zdefiniowanym horyzoncie czasowym. Oprócz tego, jest wskazane przygotowanie przejściowych modeli obliczeniowych uwzględniających m.in. realizację planów rozwojowych sieci WN i NN, które są opracowywane w innym cyklu i z dłuższym horyzontem czasowym. W prezentowanym w artykule przypadku będzie to jeden model: RT1.

#### 3.2. Ocena stanu istniejącego

Badania symulacyjne na modelu RT0 mogą zostać wykorzystane do weryfikacji modelu w zakresie odwzorowania aktualnego stanu pracy sieci. Symulacje są wykorzystywane do weryfikacji modeli obliczeniowych, do potwierdzenia zagrożeń napięciowych lub obciążeniowych.

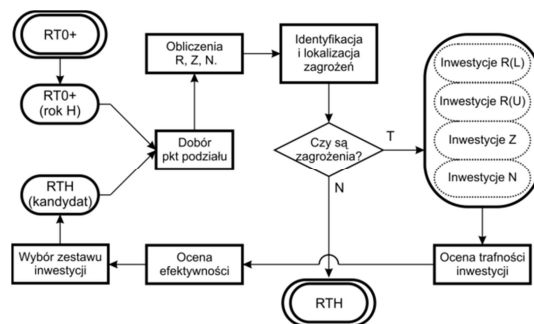
#### 3.3. Ocena warunków pracy sieci SN z uwzględnieniem zaplanowanych inwestycji sieciowych

Model RT0+ uwzględnia inwestycje z aktualnego planu rozwoju sieci oraz inne (dodatkowe) rezultaty działań realizowanych w odpowiedzi na aktualne potrzeby. Do modelu RT0+ mogą zostać wprowadzone również inwestycje spoza planu rozwoju, które z powodu ograniczonych ram czasowych i krótkiego okresu pomiędzy RT0 i RT0+, mogą zostać realnie zrealizowane w tak

krótkim okresie czasu. Przykładowo, inwestycjami takimi są połączenia łączące linie równoległe lub połączenia na skrzyżowaniach. Uwzględniane inwestycje, to również nowe wyprowadzenia z rozdzielni SN GPZ prowadzone po trasie istniejącej linii do pierwszego rozgałęzienia, czy wymiana przewodów w istniejącej linii. W modelu RT0+ uwzględniane są prognozowane zmiany zapotrzebowania na energię elektryczną.

#### 3.4. Metodyka wyznaczania inwestycji sieciowych w zdefiniowanym horyzoncie czasowym

Model docelowy, RTH, jest modelem wypracowywanym iteracyjnie. Metodyka kształtowania modelu RTH została pokazana na rysunku 2.



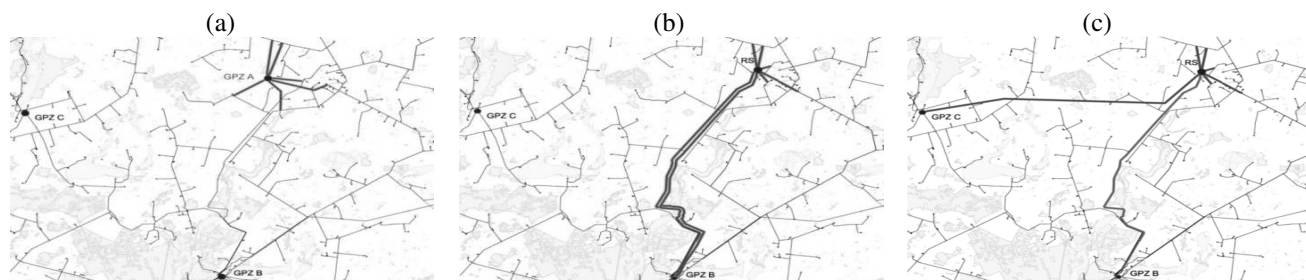
Rys. 2. Idea iteracyjnego wyznaczania zbioru inwestycji sieciowych dla przewidzianego horyzontu czasowego

W pierwszej iteracji, jako model RTH jest przyjmowany zaadaptowany model RT0+. Przez adaptację należy rozumieć uwzględnienie zmian zapotrzebowania i generacji w prognozowanym horyzoncie czasowym H, spowodowane rozbudową sieci WN i NN zmiany wartości mocy i prądów zwarciovych oraz aktualizację parametrów modelu niezawodnościowego, jako efekt starzenia. W rezultacie w pierwszej iteracji poddawane są ocenie warunki pracy sieci SN przy założeniu braku ingerencji OSD w strukturę sieci elektroenergetycznej. Przeprowadzane są analizy rozplływowe (R) oraz zwarciovowe (Z) dla przyjętych modeli obliczeniowych dla układu normalnego pracy sieci, sprawdzane są kryteria 1-3 (podpunkt 2.2). Przeprowadzana jest analiza niezawodności (N) w celu identyfikacji obszarów podatnych na częste przerwy w zasilaniu. Każde ze zidentyfikowanych zagrożeń jest poddawane ocenie.

Następuje etap wyszukiwania inwestycji sieciowych eliminujących zagrożenia: przeciążeniowe – R(L), napięciowe – R(U), zwarciovowe – Z oraz inwestycji dedykowanych do zwiększenia ciągłości dostaw energii elektrycznej do odbiorców końcowych – N. Każda z inwestycji ma wpływ na warunki pracy sieci elektroenergetycznej, stąd też każda jest poddawana ocenie ze względu na wszystkie rozpatrywane kryteria.

Opisywana interakcja komplikuje proces wypracowywania zestawu najkorzystniejszych inwestycji. Proponowane inwestycje są poddawane ocenie trafności oraz ocenie efektywności, zgodnie ze wzorem (3).

Ze zbioru inwestycji wybierane są najefektywniejsze inwestycje do eliminacji zagrożeń. Inwestycje te są wprowadzane do zaadaptowanego modelu RT0+. Tak przygotowany model sieci jest poddawany ocenie, czy spełnia oczekiwania OSD. W tym celu są przeprowadzane analizy mające ocenić wystarczalność proponowanego zestawu inwestycji. Na skutek zmiany struktury sieci oraz punktów podziału, mogą wystąpić nowe zagrożenia dla



Rys. 3. Warianty rozbudowy sieci elektroenergetycznej

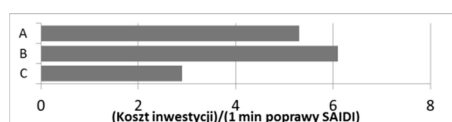
pracy sieci SN. W przypadku zidentyfikowania zagrożeń dla pracy sieci lub niewystarczalności proponowanych wcześniej działań, zbiór inwestycji do wprowadzenia jest aktualizowany. Procedura oceny wystarczalności i efektywności proponowanych inwestycji jest realizowana cyklicznie, aż zostanie zidentyfikowany model, w którym zagrożenia nie zostaną zidentyfikowane. Tak wypracowany model jest modelem docelowym (RTH) dla analizowanego horyzontu czasowego.

#### 4. PREZENTACJA WYNIKÓW SYMULACJI

Na analizowanym obszarze sieci SN zidentyfikowano problemy z zapewnieniem wymaganego poziomu ciągłości dostaw energii elektrycznej. Dodatkowo, w stacjach zwiększonego zapotrzebowania wartości napięć były obniżone. Dla tego obszaru rozpatrzono trzy warianty rozbudowy sieci SN w następującej postaci:

- A. GPZ 110 kV/SN z wyprowadzeniami liniowymi do istniejących ciągów SN – rys. 3a,
- B. dwusekcyjny RS zasilany z GPZ B nową, dwutorową linią SN – rys. 3b,
- C. dwusekcyjny RS zasilany z GPZ C (nowa linia kablowa) i GPZ B (wykorzystanie istniejącej linii SN) – rys. 3c.

Rezultat przeprowadzonych analiz w postaci oceny efektywności inwestycji został pokazany na rysunku 4.



Rys. 4. Ocena efektywności rozpatrywanych wariantów rozbudowy sieci elektroenergetycznej SN

Oceniając daną inwestycję poprzez jej wpływ na wartość wskaźnika *SAIDI*, najkorzystniejszym rozwiązaniem byłby wariant A. Jest to wariant najdroższy. Pomędzy wariantami B i C nie zaobserwowano istotnej różnicy we wpływie na wartość wskaźnika *SAIDI*. Jednocześnie, wariant B jest wariantem droższym od wariantu C, stąd w analizowanym przypadku najefektywniejszym

rozwiązaniem jest wariant C rozbudowy sieci – wariant ten został wybrany do zbioru inwestycji do wprowadzenia w modelu RTH. Warto zwrócić uwagę, że wariant A, mimo iż jest najdroższy, jest wariantem efektywniejszym niż wariant B. Stosunkowo duże koszty inwestycyjne są rekompensowane spodziewanym ograniczeniem liczby i czasu trwania przerw w zasilaniu.

#### 5. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule przedstawiono metodykę iteracyjnego wypracowywania modelu sieci dla wskazanego horyzontu czasowego w celu wyznaczenia najefektywniejszego zbioru inwestycji sieciowych do redukcji *SAIDI*. Każda inwestycja jest oceniana indywidualnie celem wyznaczenia najkorzystniejszych rozwiązań. Przeprowadzona w ten sposób ocena warunków pracy sieci jest niezbędna w celu przygotowania koncepcji rozwoju sieci SN operatora oraz spełnienia wymogu systematycznego obniżania wskaźników ciągłości zasilania

Z powodu ograniczeń edycyjnych, pozostałe fragmenty metodyki, m.in. przygotowanie harmonogramu inwestycji, analiza modeli przejściowych, stanów n-1 zostały pominięte w niniejszym artykule.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

1. Urząd Regulacji Energetyki: Regulacja jakościowa w latach 2016-2020 dla Operatorów Systemów Dystrybucyjnych, 2015 r.
2. IEEE 1366-2012: Guide for electric power distribution reliability indices, 2012 r.
3. Instytut Energetyki Oddział Gdańsk: Opracowanie nowego, efektywnego algorytmu do poprawy niezawodności pracy sieci SN, Gdańsk 2017 r.
4. Tomczykowski J.: Sieci elektroenergetyczne pięciu największych operatorów. Energia Elektryczna nr 5/2015 r.
5. Brown, R.E.: Electric Power Distribution Reliability, Second Edition, CRC Press 2009 r.

### MEDIUM VOLTAGE GRID DEVELOPMENT CONCEPT WITH CONSIDERATION OF THE RELIABILITY ANALYSIS

The article presents the algorithm for determination optimal sets of investments in MV grids with the consideration of the expected voltage profile, loading and, most importantly, ageing of the MV grid components. The final set of the MV grid investment is appointed iteratively in order to achieve the best performance.

**Keywords:** Distribution system, MV grid development, reliability analysis.