

METODA OKREŚLANIA ZDOLNOŚCI PRZYŁĄCZENIOWYCH WĘZŁÓW SIECI ZAMKNIĘTEJ NN Z WYKORZYSTANIEM DWUPOZIOMOWEJ OPTIMALIZACJI TYPU „BLACK-BOX” – STUDIUM PRZYPADKU

Andrzej WĘDZIK¹

1. Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki,
tel.: 42 631 26 08 e-mail: andrzej.wedzik@p.lodz.pl

Streszczenie: W chwili obecnej, do wyznaczania zdolności przyłączeniowych węzłów sieci przesyłowej i dystrybucyjnych, wykorzystuje się zazwyczaj metodę węzłów koherentnych. Metoda ta posiada jednak pewne ograniczenia, które nie pozwalają w sposób jednoznaczny wyznaczyć poszukiwanych wartości mocy, określających zdolności przyłączeniowe węzłów analizowanej sieci. W artykule zaproponowana została nowa metoda rozszerzenia możliwości określania zdolności przyłączeniowych węzłów dowolnej sieci zamkniętej NN, z wykorzystaniem dwupoziomowej optymalizacji typu „Black-box”. Obliczenia i analizy wykonane zostały dla pełnego, nieliniowego modelu polskiego KSE. Otrzymane wyniki, pokazują możliwości wykorzystania tej metody dla dowolnej konfiguracji węzłów poddawanych analizie, bez konieczności przeprowadzania podziałów na grupy koherentne. Zaproponowana metoda wykazała możliwości uwzględniania w obliczeniach wszelkich ograniczeń istotnych z punktu widzenia poprawnej pracy systemu, takich jak: dopuszczalne poziomy napięcie, dopuszczalne obciążenia linii, maksymalne moce zwarciove w węzłach sieci czy stany awaryjne ($n-1$) pracy systemu.

Słowa kluczowe: Optymalizacja, „Black-box”, zdolności przyłączeniowe, optymalizacja rozptyłów mocy.

1. WPROWADZENIE I OPIS PROBLEMU

Zgodnie z zapisami art. 7, pkt 8l, ustawy „Prawo energetyczne” [1] przedsiębiorstwo energetyczne zajmujące się przesyłaniem lub dystrybucją energii elektrycznej jest obowiązane sporządzać informacje dotyczące:

„... wartości łącznej dostępnej mocy przyłączeniowej dla źródeł, ... dla całej sieci przedsiębiorstwa o napięciu znamionowym powyżej 1 kV z podziałem na stacje elektroenergetyczne lub ich grupy wchodzące w skład sieci o napięciu znamionowym 110 kV i wyższym; ...”.

Informacje te powinny być aktualizowane co najmniej raz na kwartał i umieszczane są na stronie internetowej danego Operatora [2]. Analizy i obliczenia oparte są zazwyczaj na wyznaczaniu grup węzłów koherentnych, czyli identyfikacji grup węzłów wzajemnie ze sobą skorelowanych pod względem współczynników wrażliwości. Na dzień dzisiejszy jest to praktycznie jedyna, zaakceptowana przez energetykę zawodową metoda określania dostępnej mocy przyłączeniowej dla źródeł. Niektórzy autorzy podejmowali wcześniej próby rozwiązania tego problemu stosując metody oparte na metodzie węzłów koherentnych [3,4] lub proponując własne metody oparte o linearyzację stosowanego modelu [5,6] lub wykorzystanie metod optymalizacji nieliniowej [7-9]. Proponowane dotychczas metody,

w większości przypadków, opierają się jednak na wielu uproszczeniach (np. linearyzacja modelu), wykorzystaniu metod mało przydatnych w praktyce działania rynku energii elektrycznej (np. ERO) lub mało przejrzystych kryteriach przyjmowanych w obliczeniach (np. metoda węzłów koherentnych).

W prezentowanym artykule proponowana jest nowa metoda, rozszerzająca możliwości określania zdolności przyłączeniowych węzłów sieci zamkniętej NN, w której analizy i obliczenia mogą być wykonywane przy użyciu pełnego, nieliniowego modelu polskiego KSE, bez konieczności wprowadzania jakichkolwiek uproszczeń czy linearyzacji stosowanego modelu. Pokazano możliwości wykorzystania modułów optymalizacyjnych, zintegrowanych z komercyjnymi pakietami do obliczania rozptyłów mocy. Pokazano również, że proponowana metoda jest bardzo tania w implementacji. Opiera się ona na algorytmach optymalizacyjnych typu *open source* lub *freeware*, a jedynym warunkiem jest możliwość uzyskiwania obliczeń pośrednich z programu rozptywowego, dla którego metoda ta może stać się w pełni niezależnym, darmowym narzędziem obliczeniowym, rozszerzającym jego funkcjonalność.

Optymalizacja pracy systemu elektroenergetycznego jest problemem znanym i dobrze opisanym w literaturze [10-11]. Obecnie również komercyjne programy rozptyłowe w wielu przypadkach posiadają moduły optymalizacyjne. Podstawową wadą i niedogodnością tych modułów jest jednak to, że użytkownik nie może w dowolny sposób sformułować problemu optymalizacyjnego i w praktyce może wykorzystać jedynie któryś z modeli zaproponowanych przez autorów programu. Główną przeszkodą jest w tym przypadku brak dostępu do wszystkich zmiennych i wielkości obliczeniowych, pełnego modelu matematycznego analizowanego systemu elektroenergetycznego. W przypadku wykorzystywania oprogramowania komercyjnego, zapewniającego dużą pewność, skuteczność i wiarygodność przeprowadzanych analiz, użytkownik otrzymuje wyniki obliczeń w postaci ciągów liczb, przedstawiających sobą wartości podstawowych wielkości charakteryzujących stan pracy systemu, takich jak: wartości prądów linii, obciążenia transformatorów czy poziomy napięcie w węzłach sieci. Aby otrzymywane w ten sposób wielkości wykorzystać do rozwiązania dowolnie określonego problemu optymalizacyjnego, można wykorzystać optymalizację typu „Black-box” [12-14]. Opis matematyczny poszczególnych wielkości, np. ograniczeń, nie jest konieczny i w praktyce najczęściej nie jest znany. Należy jedynie określić granice

dolne i górne zakresu zmienności tych ograniczeń. Wynikiem działania metody jest wektor zmiennych realizujący opisany problem optymalizacyjny, przy spełnieniu sformułowanych wcześniej warunków brzegowych dla ograniczeń. Możliwości obliczeniowe mogą zostać rozszerzone w prosty sposób poprzez wykorzystanie modułów optymalizacyjnych, zintegrowanych ze stosowanym oprogramowaniem komercyjnym. Moduły te są używane wewnątrz każdej iteracji obliczeniowej programu nadrzędnego, tworząc z nim algorytm optymalizacji dwupoziomowej typu „Black-box”. Dzięki takiemu połączeniu metod, otrzymywane wyniki są lepsze niż w przypadku metody jednapoziomowej [15].

2. MODEL MATEMATYCZNY

Funkcją celu w prezentowanej metodzie jest moc netto, o którą powiększy się bilans mocy analizowanej sieci. Wartość tej mocy można obliczyć jako różnicę pomiędzy sumaryczną mocą jednostek wytwórczych przyłączanych do sieci i strat mocy czynnej w sieci, wywołanych przyłączeniem tych jednostek. Dodatkowo, moce jednostek wytwórczych przyłączanych do sieci, powinny spełniać warunek minimalizacji start mocy biernej w analizowanej sieci:

$$\max \left(\sum_{i=1}^n P_{di} - \Delta P_{dTotal} \right) \quad (1)$$

dla : $P_{di} \in \arg \min \{ \Delta Q_{dTotal} \}$

gdzie: P_{di} – moc przyłączanego źródła wytwórczego do węzła i ; n – liczba węzłów, do których przyłączane są źródła wytwórcze; ΔP_{dTotal} – sumaryczne straty mocy czynnej w sieci, wywołane przyłączeniem n jednostek wytwórczych; ΔQ_{dTotal} – sumaryczne straty mocy biernej w sieci, wywołane przyłączeniem n jednostek wytwórczych.

Dla prawidłowego procesu optymalizacji, niezbędne jest sformułowanie zależności matematycznych, opisujących ograniczenia techniczne, występujące w sieci rzeczywistej. Do najistotniejszych ograniczeń należą:

2.1. Ograniczenia przepustowości linii i transformatorów w sieci elektroenergetycznej:

$$0 \leq I_j \leq I_{jdd} \quad \forall j = 1 \dots mi \quad (2)$$

gdzie: I_j – prąd obciążenia danej linii lub transformatora; I_{jdd} – dopuszczalny prąd obciążenia linii lub transformatora; mi – sumaryczna liczba linii i transformatorów dla rozpatrywanej sieci.

2.2. Ograniczenia dopuszczalnych poziomów napięć w węzłach sieci elektroenergetycznej:

$$U_{kmin} \leq U_k \leq U_{kmax} \quad \forall k = 1 \dots mu \quad (3)$$

gdzie: U_k – wartość napięcia w węźle k analizowanej sieci; U_{kmin} – minimalna wartość napięcia w węźle k analizowanej sieci [16-18]; U_{kmax} – maksymalna wartość napięcia w węźle k analizowanej sieci [16-18]; mu – liczba węzłów dla rozpatrywanej sieci.

2.3. Ograniczenia dopuszczalnych poziomów prądów zwarciovych w węzłach sieci elektroenergetycznej:

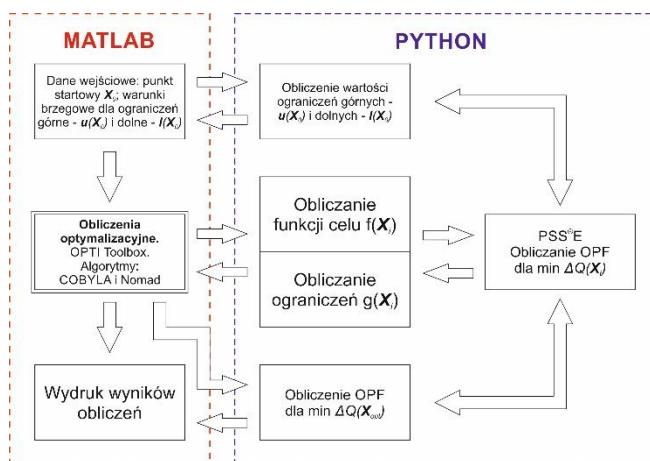
$$0 \leq I_{kzw} \leq I_{kzwmax} \quad \forall k = 1 \dots mu \quad (4)$$

gdzie: I_{kzw} – wartość prądu zwarciovego w węźle k analizowanej sieci; I_{kzwmax} – maksymalna wartość prądu zwarciovego w węźle k analizowanej sieci.

Jeżeli badana sieć nie spełnia warunku $n-1$, również dla przypadku pracy tej sieci bez przyłączonych, dodatkowych mocy wytwórczych, wówczas, przed rozpoczęciem obliczeń optymalizacyjnych, konieczna jest korekta ograniczeń, używanych w procesie optymalizacji [15].

W celu zachowania na niezmiennym poziomie bilansu mocy wytwórczych w całym systemie elektroenergetycznym, moc wyznaczonych jednostek regulowanych korygowana jest o moc nowych, przyłączanych źródeł wytwórczych. Suma mocy nowych, przyłączanych źródeł wytwórczych odejmowana jest od mocy wyznaczonych jednostek regulowanych równomiernie, w proporcji do mocy tych jednostek. W praktyce, ze względu np. na mechanizmy rynkowe, nie należy jednak dopuszczać do całkowitego wyłączenia jednostek regulowanych. Ich regulacja powinna odbywać się w przedziale $\langle P_{gen}, P_{min} \rangle$. Dzięki temu zapewnione zostaną między innymi minimalne wymagania dotyczące regulacji napięć i stabilności całego systemu elektroenergetycznego.

Warunki 2.1-2.3 (równania (2)-(4)) oraz korekta bilansu mocy sprawdzane są w każdym kroku obliczeniowym proponowanej metody. Dodatkowo, w każdym kroku obliczeniowym zamiast klasycznego rozplywu mocy, obliczany jest optymalny rozplyw mocy, zapewniający minimalizację sumarycznych strat mocy biernej w sieci, wywołanych przyłączeniem n jednostek wytwórczych. Schemat blokowy zaprezentowanej metody obliczeniowej, przedstawiony został na rysunku 1.



Rys. 1 Schemat blokowy rozszerzonej metody określania zdolności przyłączeniowych węzłów sieci zamkniętej NN z wykorzystaniem dwupoziomowej optymalizacji typu „Black-box”.

Tablica 1. Wartości dostępnych mocy przyłączeniowych dla źródeł wytwórczych przyłączanych do węzłów grupy Poddębice

| Węzeł | Moc przyłączeniowa | | | | | Stan pracy systemu | Element decydujący o wartości mocy minimalnej | |
|---------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|---------------|-----------|---------------|--------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Wg [2] | COBYLA | | Nomad | | | | |
| | | 1-poziom. | 2-poziom. | 1-poziom. | 2-poziom. | | | |
| [-] | [MW] | [MW] | [MW] | [MW] | [MW] | [-] | [-] | |
| Dopuszczalne obciążenie linii i transformatorów = 100% | | | | | | | | |
| Cała grupa | 0 | 72,454 | 78,494 | 72,454 | 78,437 | (n-1) | Wyłączona linia Szadek-Zduńska Wola | Dopuszczalne obciążenie (100%) linii Poddębice 1-Adamów Maksymalny poziom napięcia w węzłach: Poddębice 1, Poddębice 2 i Szadek |

Tablica 2. Wartości dostępnych mocy przyłączeniowych dla źródeł wytwórczych przyłączanych do węzłów grupy Sochaczew

| Węzeł | Moc przyłączeniowa | | | | | Stan pracy systemu | Element decydujący o wartości mocy minimalnej | |
|---------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|----------------|-----------|---------------|--------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Wg [2] | COBYLA | | Nomad | | | | |
| | | 1-poziom. | 2-poziom. | 1-poziom. | 2-poziom. | | | |
| [-] | [MW] | [MW] | [MW] | [MW] | [MW] | [-] | [-] | |
| Dopuszczalne obciążenie linii i transformatorów = 100% | | | | | | | | |
| Cała grupa | 120 | 220,994 | 231,194 | 221,714 | 237,65 | (n-1) | Wyłączona linia Szadek-Zduńska Wola | Dopuszczalne obciążenie (100%) linii Poddębice 1-Adamów Maksymalny poziom napięcia w węzle Szadek |

3. STUDIUM PRZYPADKU

W celu praktycznego przetestowania zaproponowanej metody, wykonane zostały obliczenia na rzeczywistym, pełnym, nieliniowym modelu Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. Podobnie jak w przypadku algorytmu jednopoziomowego [15], do rozważań wybrany został wariant reprezentujący układ systemu dla szczytu letniego 2016 r. oraz Spółka Dystrybucyjna – PGE Dystrybucja S.A., Oddział Łódź-Teren. W ramach rozpatrywanej Spółki, do porównań, wybrane zostały dwie grupy węzłów koherentnych, dla których określone zostały wartości dostępnych mocy przyłączeniowych [2]:

- Grupa Poddębice (Poddębice 1, Poddębice 2, Szadek);
- Grupa Sochaczew (Sochaczew, Boryszew, Widok, Teresin, Bielnik, Żyrardów).

Inne założenia pozostały niezmiennione i są identyczne jak dla metody jednopoziomowej [15].

Do obliczania optymalnych rozpyłów mocy, zapewniających minimalizację sumarycznych strat mocy biernej w sieci, wywołanych przyłączeniem n jednostek wytwórczych, wykorzystany został moduł optymalizacyjny, stanowiący integralną część programu PSS[®]E v33.7, firmy Siemens PTI.

Dla przedstawionych powyżej założeń, wykonane zostały obliczenia, których wyniki zestawione zostały w Tablicach 1 i 2.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone obliczenia i analizy, wykazały możliwość wykorzystania metody dwupoziomowej optymalizacji typu „Black-box” do rozszerzenia zakresu określanie zdolności przyłączeniowych węzłów dowolnej sieci zamkniętej NN. Zaprezentowane w artykule wyniki pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków szczegółowych:

- Analizy i obliczenia zdolności przyłączeniowych mogą być wykonywane przy użyciu pełnego, nieliniowego modelu polskiego KSE bez konieczności wprowadzania jakichkolwiek uproszczeń czy linearyzacji stosowanego modelu.
- Metoda może być użyta dla dowolnej konfiguracji węzłów poddawanych analizie. Operator może sam określić skład takich grup węzłów, kierując się przy tym własnymi wytycznymi czy potrzebami.
- Zaproponowana metoda pokazuje możliwości uwzględniania w obliczeniach wszelkich ograniczeń istotnych z punktu widzenia poprawnej pracy systemu, takich jak: dopuszczalne poziomy napięcie, dopuszczalne obciążenia linii, maksymalne moce zwarciovowe w węzłach sieci czy stany awaryjne ($n-1$) pracy systemu.
- Dzięki zastosowaniu proponowanej metody możliwe jest określenie niewrażliwych elementów sieci, których niedostateczna obciążalność stanowi największą przeszkodę w przyłączeniu dodatkowych mocy wytwórczych. Dzięki temu Operator może w prosty sposób określić „wąskie gardła” swojej sieci.
- Wyniki uzyskiwane przy wykorzystaniu zaproponowanej metody pokazują sposoby zwiększenia możliwości przyłączania nowych mocy wytwórczych przy aktualnej konfiguracji KSE i są znacznie korzystniejsze dla potencjalnych inwestorów, niż wyniki otrzymane za pomocą metody węzłów koherentnych czy metody jednopoziomowej [15].
- W przypadku posiadania przez Operatora programu rozpyłowego z modułami optymalizacyjnymi, zaproponowana metoda jest bardzo tania w implementacji. Opiera się ona na algorytmach optymalizacyjnych typu *open source* lub *freeware*, a jedynym warunkiem jest możliwość uzyskiwania obliczeń pośrednich z programu rozpyłowego. Użyty w artykule MATLAB (jako interfejs obliczeniowy) może zostać w pełni zastąpiony procedurami napisanymi np. w języku Python.

- g. Oba testowane algorytmy optymalizacyjne potwierdziły swoją przydatność do rozwiązania zaprezentowanego problemu.
- h. Wyniki obliczeń zależą od stosowanego algorytmu [19] i są nieco lepsze w przypadku algorytmów optymalizacji globalnej (Nomad [20-22]).

5. BIBLIOGRAFIA

1. Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. - Prawo Energetyczne. Dziennik Ustaw z 1997 r., nr 54, poz. 348 wraz późniejszymi zmianami.
2. Informacja o dostępnych mocach przyłączeniowych dla źródeł wytwórczych przyłączanych do sieci elektroenergetycznej PGE Dystrybucja S.A. o napięciu znamionowym powyżej 1 kV (zaktualizowana za III kw.2016 r.), PGE Dystrybucja S.A., Biuro Zarządzania Rozwojem Sieci, Lublin, 2016, <http://www.pgedystrybucja.pl/dystrybucja/dla-klienta/procedury-przylaczeniowe/informacje-o-dostepnych-mocach-przylaczeniowych>
3. Bajor M., Bezpieczna praca systemu o ograniczonych zdolnościach przesyłowych w sytuacji wysokiej generacji wiatrowej, Jubileuszowa XV Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, Jurata, 8–10 czerwca 2011, Tom IV, str. 11-15.
4. Bajor M., Jankowski R., Widelski G., "Area-Wide Management of a Significant Wind Generation as a Way to Ensure a Safe Grid Operation," Acta Energetica, vol. 3, no. 20, pp. 17-22, Jul. 2014.
5. Słabosz S., Sobierajski M., Rojewski W., „Metoda liniowej optymalizacji dopuszczalnej generacji wiatrowej w węzłach sieci przesyłowej”, Acta Energetica, vol. 2, no. 7, pp. 55-55, Apr. 2011.
6. Kocot H., „Zdolności przyłączeniowe węzłów dystrybucyjnej sieci 110 kV”, Konferencja Electrical Power Networks - EPNNet 2016, 19-21 września 2016, Szklarska Poręba.
7. Korab R., "Zdolności przyłączeniowe krajowej sieci 400 i 220 kV", Elektroenergetyka: współczesność i rozwój, Nr 2-3(4-5), 2010, str. 46—54.
8. Kacejko P., Pijarski P., „Ocena możliwości przyłączeniowych krajowej sieci przesyłowej planowanej na lata 2020-2025 w kontekście prawdopodobnych scenariuszy budowy nowych jednostek wytwórczych”, Rynek Energii nr 2/2013, str. 42-47.
9. Przygodzki M., Turczak R., Gwóźdź R., Kałuża S., „Ocena zdolności przyłączeniowych Krajowego Systemu Przesyłowego w perspektywie długoterminowej”, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 90 NR 7/2014, str. 123-126.
10. Momoh J. A., „Electric Power System Applications of Optimization”, Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN 978-1-4200-6587-9, 2009
11. Soliman S. A.-H., Mantawy A.-A. H., „Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems”, Springer, ISBN 978-1-4614-1751-4, DOI 10.1007/978-1-4614-1752-1, 2012.
12. Wędzik A., Siewierski T., Szypowski M., „The use of „Black-box” optimization method for determination of connection capacity in electric power grid”, Applied Energy, 2017, (w recenzji).
13. Davis E. F., „Modeling and optimization of process engineering problems containing black-box systems and noise”, PhD dissertation, New Brunswick, New Jersey, October, 2008.
14. Schaul T., „Studies in Continuous Black-box Optimization”, Technische Universität München, PhD dissertation, 2011.
15. Wędzik A., „Określanie zdolności przyłączeniowych węzłów sieci zamkniętej NN z wykorzystaniem optymalizacji typu „Black-box” – studium przypadku”, Konferencja APE'17, Jastrzębia Góra, 7-9 czerwca 2017.
16. Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dziennik Ustaw z 2007 r., nr 93, poz. 623 wraz późniejszymi zmianami.
17. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej. Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci. PSE - Operator S.A. Wersja 2.0. z 15 grudnia 2011 r. (Tekst obowiązujący od dnia: 1 maja 2016 r.).
18. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej. PGE S.A., 2013 (Tekst jednolity obowiązujący od dnia: 1 października 2016r.).
19. Currie J., Wilson D. I., „OPTI: Lowering the Barrier Between Open Source Optimizers and the Industrial MATLAB User”, Savannah, Georgia, USA, 8-11 January, 2012.
20. Abramson M. A., Audet C., Couture G., Dennis Jr. J. E., Le Digabel S., Tribes C., „The NOMAD project”, <https://www.gerad.ca/nomad/>.
21. Audet C., Dennis Jr. J. E., „Mesh Adaptive Direct Search Algorithms for Constrained Optimization”, SIAM Journal on Optimization, 17/1, 2006, p. 188-217, doi:10.1137/040603371.
22. Le Digabel S., „Algorithm 909: NOMAD: Nonlinear Optimization with the MADS algorithm”, ACM Transactions on Mathematical Software, 37/4, 2011, p. 1-15.

METHOD OF CONNECTION CAPACITY DETERMINATION IN HV CLOSED NETWORK BY THE USE OF BI-LEVEL “BLACK-BOX” OPTIMIZATION – A CASE STUDY

In the presented article the bi-level "Black-box" optimization method was proposed for improvement of connection capacity determination in nodes of any HV closed network. The calculations and analyzes were made for the full non-linear model of Polish Power System. The obtained results show the possibility of using this method for determination of a connection capacity for any configuration of nodes, without determination of coherent groups. The proposed method takes into account all limitations relevant to the safe operation of the system, such as bus voltage levels, line load and maximum bus short-circuit currents, both in power system normal operation and in contingency states ($n-1$).

Keywords: Optimization, „Black-box”, connection capacity, Optimal Power Flow.