

Metody stosowane w analizie awaryjnych wyłączeń w sieci elektroenergetycznej

Streszczenie: W artykule zostanie przedstawiona metoda wyznaczania mocy gałęziowej po wyłączeniu jednego, dwóch lub trzech dowolnych elementów sieci elektroenergetycznej. W metodzie tej moc gałęziowa jest obliczana bez konieczności ponownego wyznaczania macierzy admitancyjnej i jej odwracania po każdym wyłączeniu. Następnie zostanie zaprezentowana metoda sprawdzania spójności grafu rozważanej sieci po analizowanych wyłączeniach.

Abstract: The paper will present a branch power calculation method after switching off one, two or three chosen electrical network elements. In this method the branch power is calculated without having to reassess the admittance matrix and inverse it every time after switching off. Next, a method assessing the graph connectivity of an analysed network after switching off will be presented. (*The Methods Used in Contingency Analysis of an Electrical Network*)

Słowa kluczowe: zakłócenia, moc gałęziowa, spójność grafu sieci.
Keywords: faults, branch power, graph connectivity of an electrical network.

doi:10.12915/pe.2014.03.19

Wstęp

W przesyłowej sieci elektroenergetycznej mogą wystąpić zakłócenia polegające na awaryjnych wyłączeniach pojedynczych lub kilku elementów sieci, w tym wyłączenia kaskadowe. Analiza tych zagadnień jest złożonym problemem, który jest szeroko omówiony w książkach np. [1, 2], czy w programie obliczeniowym [3]. Ogólnie metody badania awaryjnych wyłączeń stosują metody liniowe [1, 3, 4, 5, 6] i nieliniowe [1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14] obliczania rozplywów mocy. Osobnymi problemami rozważanymi w literaturze to: struktura systemów do badania awaryjnych wyłączeń [15, 16, 17], modelowanie stacji elektroenergetycznych [18, 19], metody wyboru wyłączanych elementów sieci elektroenergetycznej [20-33] czy opis doświadczeń ze stosowania badań awaryjnych wyłączeń [34, 35].

Najbardziej rozpowszechnione jest stosowanie zasady N-1, ale obecnie powinno stosować się zasadę N-x, gdzie: N-liczba elementów sieci; x-liczba jednocześnie wyłączanych elementów. Liczba wariantów obliczeń to kombinacja z N po x. Dla sieci wielkości sieci Polski (N=3000) i stosowaniu zasady N-1 tylko dla gałęzi mamy 3000 wariantów obliczeń, przy N-2 – $4,5 \cdot 10^6$ wariantów, a przy N-3 – $4,5 \cdot 10^9$. Dlatego tak ważnym problemem są: metody wyboru wyłączanych elementów sieci elektroenergetycznej oraz sposoby przyspieszania wykonywanych obliczeń.

Analiza awaryjnych wyłączeń w przesyłowej sieci elektroenergetycznej

Analizę awaryjnych wyłączeń w przesyłowej sieci elektroenergetycznej przeprowadza się w pierwszej kolejności przy zastosowaniu zasady N-1 (wyłączenie dowolnej gałęzi lub mocy węzłowej) a następnie wykonuje się obliczenia czy nie występują przeciążone gałęzie, czyli sprawdzenie warunku N-1-1. Jest to równoznaczne z wykonaniem:

- ✓ wyłączenia jednej gałęzi,
- ✓ wyłączenia mocy węzłowej w jednym węźle,
- ✓ wyłączenia dwóch gałęzi jednocześnie,
- ✓ wyłączenia jednej gałęzi oraz wyłączenia mocy węzłowej.

W drugim etapie może być przeprowadzona analiza awaryjnych wyłączeń przy zastosowaniu zasady N-2 (wyłączenie dowolnych dwóch gałęzi lub wyłączenie mocy węzłowej w dwóch węzłach lub wyłączenie dowolnej gałęzi z jednoczesnym wyłączeniem mocy węzłowej w jednym

węźle) a następnie obliczenie czy nie występują przeciążone gałęzie, czyli sprawdzenie warunku (N-2-1). Taki przypadek jest równoznaczny z analizą:

- ✓ wyłączenia dowolnych trzech gałęzi jednocześnie,
- ✓ wyłączenia dowolnych dwóch gałęzi z jednoczesnym wyłączeniem mocy węzłowej w jednym węźle,
- ✓ wyłączenia dowolnej jednej gałęzi z jednoczesnym wyłączeniem mocy węzłowej w dwóch węzłach.

Mając zdefiniowane ww. zdarzenia wykonywane są obliczenia rozplywu mocy czynnej metodą dc. Na podstawie wyników tych obliczeń wyznacza się moce czynne w gałęziach po awaryjnych wyłączeniach. W przypadku wystąpienia przeciążenia zdarzenie to jest klasyfikowane, jako zdarzenie o jednym więcej wyłączeniu. Zastosowanie zasady N-1 i wystąpieniu przeciążenia w jednej gałęzi to przypadek wyłączenia dwóch elementów jednocześnie. Po każdym obliczeniu rozplywu mocy wykonuje się ponowny rozdział mocy jednostek generacyjnych a następnie wyznacza się sumaryczną wyłączoną moc podczas danego zdarzenia.

W obliczeniach awaryjnych wyłączeń zastosowano metodę kompensacyjną tzn. nie wyłącza się gałęzi, a wprowadza się w węzłach początkowym i końcowym gałęzi dodatkowe moce równoważne wyłączeniu tej gałęzi. Powoduje to, że po wyłączeniu gałęzi nie musimy wyznaczać nowej macierzy admitancyjnej a następnie jej odwracać. Założono także, że rozważana sieć elektroenergetyczna jest siecią zamkniętą, w której mogą występować dowolnie duże fragmenty sieci otwartej (promieniowej).

Wyłączenie jedynej gałęzi

Rozważono wyłączenie pojedynczej gałęzi łączącej węzły k-ty oraz l-ty, i należącej do sieci zamkniętej. Dodatkowe moce równoważne wyłączeniu gałęzi mają tą samą wartość, ale przeciwny znaki, czyli $\Delta P_k = -\Delta P_l$. Pod wpływem tych dodatkowych mocy (równoważnych wyłączeniu gałęzi) mamy zmianę kątów w każdym węźle, a więc zmiany mocy płynących w każdej gałęzi. Zmianę kątów pomiędzy napięciami spowodowanymi wyłączeniem gałęzi wyznaczamy z równania rozplywów mocy metodą stałoprądową postaci:

$$(1) \quad \delta = X \cdot P$$

gdzie: δ – macierz kątów w węzłach; X – macierz impedancyjna (reaktancyjna) sieci (odwrotność macierzy

admitancyjnej sieci); \mathbf{P} - macierz mocy węzłowych. Wartość mocy dodatkowej włączanej w węzle k-tym ΔP_k oblicza się z zależności:

$$(2) \quad \Delta P_k = \frac{P_{kl}}{1 - b_{kl} \cdot (X_{kk} - X_{kl} - X_{lk} + X_{ll})}$$

gdzie: P_{kl} - moc płynąca w gałęzi kl przed jej wyłączeniem; $X_{kk}, X_{kl}, X_{lk}, X_{ll}$ - elementy macierzy impedancyjnej sieci; b_{kl} - admitancja gałęzi kl.

Po wyznaczeniu wartości mocy dodatkowej włączanej w węzle k-tym oraz l-tym można, korzystając z wzoru (1) i modyfikując macierz mocy węzłowych, wyznaczyć moc płynącą w dowolnej, obserwowanej gałęzi łączącej węzły m-ty oraz n-ty po wyłączeniu gałęzi kl:

$$(3) \quad P_{mnw} = P_{mn} + \frac{b_{mn} \cdot (X_{mk} - X_{ml} - X_{nl} + X_{nk}) \cdot P_{kl}}{1 - b_{kl} \cdot (X_{lk} - X_{kl} - X_{lk} + X_{ll})}$$

gdzie: P_{mn} - moc płynąca gałęzią mn przed wyłączeniem gałęzi kl.

Przypadek wyłączanie pojedynczej gałęzi oraz poniżej rozważany przypadek wyłączenia mocy węzłowej w jednym węzle był rozważany w literaturze [1, 3, 4, 5, 6].

Wyłączenie dwóch gałęzi

Założono, że zostaną wyłączone dwie gałęzie należące do sieci zamkniętej, jedna gałąź łącząca węzły i-ty oraz j-ty a druga łącząca węzły k-ty oraz l-ty, w tych węzłach wprowadzono dodatkowe moce ΔP_i i ΔP_j oraz moce ΔP_k

i ΔP_l . W węzłach i, j, k, l nastąpi zmiana kąta, a zależność pomiędzy mocami płynącymi tymi gałęziami przed ich wyłączeniem a dodatkowymi mocami włączanymi w węzłach i-tym oraz k-tym jest postaci:

$$(4) \quad \begin{bmatrix} P_{ij} \\ P_{kl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - b_{ij} \cdot M_{ii}) & -b_{ij} \cdot M_{ik} \\ -b_{kl} \cdot M_{ki} & (1 - b_{kl} \cdot M_{kk}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta P_k \end{bmatrix}$$

$$(12) \quad \begin{bmatrix} P_{ij} \\ P_{kl} \\ P_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - b_{ij} \cdot M_{ii}) & -b_{ij} \cdot M_{ik} & -b_{ij} \cdot M_{im} \\ -b_{kl} \cdot M_{ki} & (1 - b_{kl} \cdot M_{kk}) & -b_{kl} \cdot M_{km} \\ -b_{mn} \cdot M_{mi} & -b_{mn} \cdot M_{mk} & (1 - b_{mn} \cdot M_{mm}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta P_k \\ \Delta P_m \end{bmatrix}$$

W równaniu (12) wielkości oznaczone symbolem M obliczamy korzystając z wzorów od (5) do (8). Równanie (12) zapisujemy w postaci równania (9) a wartości mocy dodatkowej włączanej w węzłach i-tym, j-tym, k-tym, l-tym,

$$(13) \quad P_{pqw} = P_{pq} + b_{pq} \cdot (X_{pi} - X_{pj} - X_{qj} + X_{qi}) \cdot \Delta P_i + b_{pq} \cdot (X_{pk} - X_{pl} - X_{ql} + X_{qk}) \cdot \Delta P_k + b_{pq} \cdot (X_{pm} - X_{pn} - X_{qn} + X_{qm}) \cdot \Delta P_m$$

Powyższe zależności pozwalają wyznaczyć moc w dowolnej gałęzi po wyłączeniu jednej, dwóch lub trzech innych dowolnych gałęzi bez konieczności wyznaczania nowej macierzy impedancyjnej sieci. Skracza to znacznie czas obliczeń mocy gałęziowej po wyłączeniu gałęzi. Algorytm powyższy łatwo rozszerzyć na jednoczesne wyłączenie większej liczby gałęzi.

Wyłączenia mocy węzłowej

Założono wyłączenie mocy węzłowej (generacyjnej lub odbieranej) w jednym, k-tym węzle. Wyłączenie mocy o

gdzie $M_{ij}, M_{ik}, M_{ki}, M_{kk}$ współczynniki obliczane są z zależności od (5) do (8):

$$(5) \quad M_{ii} = X_{ii} - X_{ij} - X_{ji} + X_{jj}$$

$$(6) \quad M_{ik} = X_{ik} - X_{il} - X_{jk} + X_{jl}$$

$$(7) \quad M_{ki} = X_{ki} - X_{kj} - X_{li} + X_{lj}$$

$$(8) \quad M_{kk} = X_{kk} - X_{kl} - X_{lk} + X_{ll}$$

Równanie (4) zapisano następująco:

$$(9) \quad \mathbf{P}_w = \mathbf{M} \cdot \Delta \mathbf{P}$$

Wartość mocy dodatkowej włączanej w węzłach z równania (9) wyniesie:

$$(10) \quad \Delta \mathbf{P} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{P}_w$$

Znając moce, jakie należy włączyć w rozpatrywanych węzłach można obliczyć moc P_{mnw} w gałęzi obserwowanej mn po wyłączeniu wybranych dwóch gałęzi:

$$(11) \quad P_{mnw} = P_{mn} + b_{mn} \cdot (X_{mi} - X_{mj} - X_{nj} + X_{ni}) \cdot \Delta P_i + b_{mn} \cdot (X_{mk} - X_{ml} - X_{nl} + X_{nk}) \cdot \Delta P_k$$

Moce $\Delta P_i, \Delta P_k$, jakie należy włączyć w węzłach i-tym oraz k-tym wyznaczono z wzoru (10).

Wyłączenie trzech gałęzi

Wyłączenie trzech gałęzi należących do sieci zamkniętej takich, że: jedna gałąź łączy węzły i-ty oraz j-ty, druga łączy węzły k-ty oraz l-ty, a trzecia łączy węzły m-ty oraz n-ty, powoduje konieczność wprowadzenia dodatkowych mocy w tych węzłach. Zależność pomiędzy mocami płynącymi tymi gałęziami przed ich wyłączeniem a dodatkowymi mocami włączanymi w węzłach i-tym, k-tym oraz m-tym jest postaci (12):

m-tym oraz n-tym obliczamy z równania (10). Znając moce, jakie należy włączyć w rozpatrywanych węzłach można obliczyć moc w gałęzi obserwowanej pq:

wartości ΔP_k powoduje zmianę kątów napięcia we wszystkich węzłach. W gałęzi mn po wyłączeniu mocy węzłowej w węzle k-tym popłynie moc:

$$(14) \quad P_{mnw} = P_{mn} + b_{mn} \cdot (X_{mk} - X_{nk}) \cdot \Delta P_k$$

Rozważono teraz wyłączenie mocy węzłowej w dwóch węzłach, w węzle i-tym oraz j-tym. W gałęzi mn po wyłączeniu mocy węzłowej w węzle i-tym oraz j-tym popłynie moc:

$$(15) \quad P_{mnw} = P_{mn} + b_{mn} \cdot (X_{mi} - X_{ni}) \cdot \Delta P_i + b_{mn} \cdot (X_{mj} - X_{nj}) \cdot \Delta P_j$$

Analizując wyłączenie mocy węzłowej w trzech węzłach, w węźle i-tym, j-tym oraz k-tym, w obserwowanej gałęzi mn popłynie moc:

$$(16) \quad P_{mnw} = b_{mn} \cdot (X_{mi} - X_{ni}) \cdot \Delta P_i + b_{mn} \cdot (X_{mj} - X_{nj}) \cdot \Delta P_j + b_{mn} \cdot (X_{mk} - X_{nk}) \cdot \Delta P_k + P_{mn}$$

Wyłączenia mocy węzłowej i gałęzi

Wyłączono jedną gałąź łączącą węzły i-ty oraz j-ty a także wyłączono moc węzłową w węźle k-tym. Wartość mocy dodatkowej włączonej w węźle i-tym ΔP_i oblicza się z zależności (17):

$$(17) \quad \Delta P_i = \frac{P_{ij} + b_{ij} \cdot (X_{ik} - X_{jk}) \cdot \Delta P_k}{1 - b_{ij} \cdot (X_{ii} - X_{ij} - X_{ji} + X_{jj})}$$

Moc w gałęzi mn będzie się wyrażała zależnością:

$$(18) \quad P_{mnw} = P_{mn} + \frac{b_{mn} \cdot (X_{mi} - X_{mj} - X_{nj} + X_{ni}) \cdot [P_{ij} + b_{ij} \cdot (X_{mk} - X_{nk}) \cdot \Delta P_k]}{1 - b_{ij} \cdot (X_{ii} - X_{ij} - X_{ji} + X_{jj})} + b_{mn} \cdot (X_{mk} - X_{nk}) \cdot \Delta P_k$$

Założono następnie, że zostanie wyłączona jedna gałąź należąca do sieci zamkniętej łącząca węzły i-ty oraz j-ty oraz jednocześnie wyłączono moc generacyjną w węźle k-tym i l-tym. W pierwszym etapie należy wyznaczyć moce, jakie

należy włączyć w węzłach i-tym oraz j-tym spowodowane wyłączeniem gałęzi ij oraz jednoczesnym wyłączeniem mocy w węźle k-tym i l-tym. Moc ΔP_i wynosi:

$$(19) \quad \Delta P_i = \frac{P_{ij} + b_{ij} \cdot (X_{ik} - X_{jk}) \cdot \Delta P_k + b_{ij} \cdot (X_{il} - X_{jl}) \cdot \Delta P_l}{1 - b_{ij} \cdot (X_{ii} - X_{ij} - X_{ji} + X_{jj})}$$

Wtedy moc w gałęzi mn będzie:

$$(20) \quad P_{mnw} = b_{mn} \cdot (X_{mi} - X_{mj} - X_{nj} + X_{ni}) \cdot \frac{P_{ij} + b_{ij} \cdot (X_{ik} - X_{jk}) \cdot \Delta P_k + b_{ij} \cdot (X_{il} - X_{jl}) \cdot \Delta P_l}{1 - b_{ij} \cdot (X_{ii} - X_{ij} - X_{ji} + X_{jj})} + b_{mn} \cdot (X_{mk} - X_{nk}) \cdot \Delta P_k + b_{mn} \cdot (X_{ml} - X_{nl}) \cdot \Delta P_l + P_{mn}$$

Przeanalizowano wyłączenie dwóch gałęzi należących do sieci zamkniętej, gdzie: jedna gałąź łączy węzły i-tym z j-tym, druga łączy węzły k-tyz l-tym, oraz wyłączeniem mocy węzłowej w węźle m-tym. W pierwszym etapie musimy

wyznaczyć moce, jakie należy włączyć w węzłach i-tym, j-tym, k-tym oraz l-tym spowodowane wyłączeniem gałęzi ij, kl oraz jednoczesnym wyłączeniem mocy w węźle m-tym:

$$(21) \quad \begin{bmatrix} P_{ij} + b_{ij} \cdot (X_{im} - X_{jm}) \cdot \Delta P_m \\ P_{kl} + b_{kl} \cdot (X_{km} - X_{lm}) \cdot \Delta P_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - b_{ij}) \cdot M_{ii} & -b_{ij} \cdot M_{ik} \\ -b_{kl} \cdot M_{ki} & (1 - b_{kl}) \cdot M_{kk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta P_k \end{bmatrix}$$

Z równania (21) wyznaczono moce ΔP_i i ΔP_k a następnie moc w gałęzi obserwowanej pq:

występują połączenia z kilkoma węzłami odniesienia, ale znajdującymi się po jednej stronie wyłączanej gałęzi.

(22)

$$P_{pqw} = P_{pq} + b_{pq} \cdot (X_{pi} - X_{pj} - X_{qi} + X_{qj}) \cdot \Delta P_i + b_{pq} \cdot (X_{pk} - X_{pl} - X_{ql} + X_{qk}) \cdot \Delta P_k$$

Wyłączenie dwóch, trzech lub więcej gałęzi dzieli sieć, gdy wyróżnik macierzy M obliczanej zgodnie z (4) jest równy zeru:

$$(24) \quad \det(M) = 0$$

Osobnym problemem nieanalizowanym w tym artykule jest wyłączenie całego węzła.

Równanie (24) jest słuszne przy założeniach takich jak dla równania (23). Niespełnienie założeń powoduje, że prawa strona równania (23) lub (24) nie jest równa zeru, lecz pewnej liczbie, którą można wyznaczyć znając jedynie macierz impedancyjną sieci elektroenergetycznej.

Algorytm sprawdzania spójności grafu rozważanej sieci po wyłączeniu gałęzi

Po wyłączeniu gałęzi rozważana sieć elektroenergetyczna może zostać podzielona na dwie, trzy lub więcej sieci [36]. Prowadząc obliczenia ograniczenia dostarczania mocy w wyniku wyłączeń awaryjnych musimy wiedzieć, kiedy taki podział wystąpi. Wyłączenie jednej gałęzi spowoduje podział na dwie sieci, gdy:

$$(23) \quad 1 - b_{kl} \cdot (X_{kk} - X_{kl} - X_{lk} + X_{ll}) = 0$$

Równanie (23) jest słuszne przy założeniu, że w sieci występuje połączenie z węzłem odniesienia w jednym węźle (występuje jeden węzeł bilansujący) lub w sieci

Wyłączenie gałęzi należącej do sieci otwartej

Identyfikacja wyłączanych gałęzi a należących do sieci otwartej odbywa się za pomocą równań (23) i (24). Wyłączenie jednej, dwóch lub trzech gałęzi należących do sieci otwartej jest równoznaczne z wyłączeniem mocy węzłowej w węźle początkowym tej gałęzi o wartości równej mocy płynącej w gałęzi przed jej wyłączeniem. Do obliczenia mocy w pozostałych gałęziach wykorzystujemy zależności (14), (15) lub (16) za wyjątkiem niewyłączonych gałęzi należących do sieci otwartej. W tych gałęziach nie może wystąpić wzrost przepływającej mocy. Wyłączone gałęzie sieci otwartej na skutek wyłączenia analizowanych gałęzi są nieistotne z punktu widzenia tych obliczeń.

Wnioski

W artykule zaprezentowano metodę wyznaczania mocy gałęziowej dowolnej gałęzi po wyłączeniu jednego, dwóch lub trzech dowolnych elementów sieci elektroenergetycznej. Elementem tym może być gałąź należąca do sieci zamkniętej lub otwartej, moc węzłowa lub ich kombinacja. W metodzie tej moc gałęziowa jest obliczana bez konieczności ponownego wyznaczania macierzy admitancyjnej i jej odwracania po każdym wyłączeniu. Takie podejście zmniejsza liczbę operacji matematycznych koniecznych do wyznaczenia mocy gałęziowej.

Została zaprezentowana metoda sprawdzania spójności grafu rozważanej sieci po analizowanych wyłączeniach. Metoda ta jest słuszna przy założeniu, że w sieci występuje jedno połączenie z węzłem odniesienia lub w sieci występuje połączenie z kilkoma węzłami odniesienia, ale znajdującymi się po jednej stronie wyłączanej gałęzi.

Niespełnienie powyższych założeń powoduje, że prawa strona równania (23) lub (24) nie jest równa zeru, ale jest równa pewnej liczbie, którą można wyznaczyć znając jedynie macierz impedancyjną sieci elektroenergetycznej.

LITERATURA

- [1] Wood A.J., Wollenberg B.F., Power Generation, Operation, and Control, *John Wiley & Sons*, (1984), 569
- [2] Chakrabarti A., Halder S., Power System Analysis: Operation and Control, *PHI Learning Pvt. Ltd.*, (2010), 1270
- [3] PSS™E 31.0 User's Manual, *Siemens Power Transmission & Distribution, Inc., Power Technologies International*, (2007)
- [4] Wai Y. Ng, Generalized Generation Distribution Factors for Power System Security Evaluations, *IEEE Trans. on Power App. and Systems*, Vol. PAS-100, (1981), 1001-1005
- [5] Kremens Z., Sobierajski M., Analiza systemów elektroenergetycznych, *WNT*, (1996), 450
- [6] Davis C. M., Overbye J., Multiple Element Contingency Screening, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 26, (2011), 1294-1301
- [7] Ricardo R. Austria, Xiaokang Xu, Michael Power, Voltage Stability Assessment of The National Grid System Using Modern Analytical Tools, *Transmission and Distribution Conference and Exposition IEEE/PES*, (2001), 229-234
- [8] Capitanescu F., Van Cutsem T., Preventive Control of Voltage Security Margins: A Multicontingency Sensitivity-Based Approach, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 17, (2002), 358-364
- [9] Ozdemir A., Jae Yun Lim, Chanan Singh, Branch Outage Simulation for MVAR Flows: Bounded Network Solution, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 18, (2003), 1523-1528
- [10] Yorino N., Li H. Q., Harada S., Ohta A., Sasaki H., A Method of Voltage Stability Evaluation for Branch and Generator Outage Contingencies, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 19, (2004), 252-259
- [11] Echavarren F.M., Lobato E., Rouco L., Contingency analysis: feasibility identification and calculation algorithm, *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 152, (2005), 645-652
- [12] Ruiz P.A., Sauer P.W., Voltage and Reactive Power Estimation for Contingency Analysis Using Sensitivities, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 22, (2007), No. 2,
- [13] Flueck A. J., Gonella R., Jayabharath R. D., A New Power Sensitivity Method of Ranking Branch Outage Contingencies for Voltage Collapse, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 17, (2002), 265-270
- [14] Bhavik Suthar, Balasubramanian R., A New Approach to Real Time Line Outage Contingency Analysis for Voltage Secure Operation of Power Systems, *Power System Technology and IEEE Power India Conference*, (2008)
- [15] Meliopoulos A. P., Power System Modeling, Analysis and Control, *Marcel Dekker Inc.*, (2004), 652
- [16] Morante Q., Ranaldo N., Vaccaro A., Zimeo E., Pervasive Grid for Large-Scale Power Systems Contingency Analysis, *IEEE Trans. on Power App. and Industrial Informatics*, Vol. 2, (2006), 165-175
- [17] Yousu Chen, Zhenyu Huang, Chavarría-Miranda D., Performance Evaluation of Counter-Based Dynamic Load Balancing Schemes for Massive Contingency Analysis with Different Computing Environments, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, (2010), 1-6
- [18] Binh Dam Q., Meliopoulos A. P., Heydt G.T., Bose A., A Breaker-Oriented, Three-Phase IEEE 24-Substation Test System, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 25, (2010), 59-67
- [19] Lourenço E. M., Costa A.S., Ribeiro R.P., Steady-State Solution for Power Networks Modeled at Bus Section Level, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 25, (2010), 10-20
- [20] Ejebe G.C., Wollenberg B.F., Automatic Contingency Selection, *IEEE Trans. on Power App. and Systems*, Vol. PAS- 98, (1979), 97-109
- [21] Zaborsky J., Whang K.W., Prasad K., Fast Contingency Evaluation Using Concentric Relaxation, *IEEE Trans. on Power App. and Systems*, Vol. PAS-99, (1980), 28-36
- [22] Lauby M.G., Mikolinnas T.A., Reppen N.D., Contingency Selection of Branch Outages Causing Voltage Problems, *IEEE Trans. on Power App. and Systems*, Vol. PAS- 102, (1983), 3899-3904
- [23] Galiana F.D., Bound Estimates of Severity of Line Outages in Power System Analysis and Ranking, *IEEE Trans. on Power App. and Systems*, Vol. PAS-103, (1984), 2612-2624
- [24] Brandwajn V., Efficient Bounding Method for Linear Contingency Analysis, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PWRS-3, (1988), 38-43
- [25] Ejebe G.C., Van Meeteren H.P., Wollenberg B.F., Fast Contingency Screening and Evaluation for Voltage Security Analysis, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PWRS-3, (1988), 1582-1590
- [26] Lauby M.G., Evaluation of a Local DC Load Flow Screening Method for Branch Contingency Selection of Overloads, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PWRS-3, (1988), 923-928
- [27] Brandwajn V., Lauby M.G., Critical Review of Branch Contingency Selection Methods, *IFAC Symposium on Power Systems and Power Plant Control*, (1989), 22-24
- [28] Brandwajn V., Lauby M.G., Complete Bounding Method for AC Contingency Screening, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PWRS-4, (1989), 724-729.
- [29] Bacher R., Tinney W., Faster Local Power Flow Solutions: The Zero Mismatch Approach, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PWRS-4, (1989), 1345-1362
- [30] Chen Y., Bose A., Direct Ranking for Voltage Contingency Selection, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PWRS-4, (1989), 1335-1344
- [31] Chen Y., Bose A., An Adaptive Pre-Filter for the Voltage Contingency Selection Function, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 5, (1990), 1478-1486
- [32] Zhihong Jia, Jeyasurya B., Contingency Ranking for On-Line Voltage Stability Assessment, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 15, (2000), 1093-1097
- [33] Hedman K.W., O'Neill R.P., Fisher E.B., Oren S.S., Optimal Transmission Switching With Contingency Analysis, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 24, (2009), 1577-1586
- [34] Jin Tao Ma, Xiaodong Liu, Hemanta Sinha, Janet Luciano, Vasilios Tsolias, User Experiences with Contingency Analysis at NSTAR, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, (2012), 1-8
- [35] Gorton I., Zhenyu Huang, Yousu Chen, Benson Kalahar, Shuangshuang Jin, Daniel Chavarría-Miranda, Baxter D., Feo J., A High-Performance Hybrid Computing Approach to Massive Contingency Analysis in the Power Grid, *Fifth IEEE International Conference on e-Science*, (2009), 277-283
- [36] Lachs W. R., Controlling Grid Integrity After Power System Emergencies, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 17, (2002), 445-450

Autor: dr hab. inż. Andrzej Kanicki, prof. nadzw., Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, e-mail: andrzej.kanicki@p.lodz.pl