

Analiza pracy elektrowni odnawialnej z maszynami indukcyjnymi

Streszczenie. Badano współpracę elektrowni odnawialnej o małej mocy z wycinkiem systemu zasilającego. W elektrowni pracują 3 generatory indukcyjne, napędzane turbinami wiatrowymi lub 3 silniki. Wybrane wyniki analizy pracy tego układu wykonane metodami statycznymi porównano z uzyskanymi symulacyjnie z zastosowaniem programów do modelowania pracy systemu. Badano spadki napięcia na elementach układu w różnych wariantach pracy maszyn. Porównywano również uzyskane wartości prądów zwarcia trójfazowego i jednofazowego. Wyniki uzyskane różnymi metodami na ogół są zbliżone, ale występują również znaczące różnice pomiędzy nimi.

Abstract. Cooperation between small renewable power station and the supply system was studied. 3 induction generators, powered by wind turbines or 3 induction motors are working in the power plant. Selected results of the analysis of the system operation made static methods were compared with those obtained by simulation using programs for the system modeling. Voltage drops on the elements of the system in different variants work of machines was studied. The obtained values of short-circuit currents of three-phase and single-phase were also compared. The results obtained by various methods are generally similar, but there are also significant differences between them. (**Work analysis of renewable power plant with induction machines**).

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, sieć niskiego napięcia, modelowanie i symulacja, spadki napięcia, prądy zwarciove
Keywords: renewable energy sources, low-voltage supply network, modeling and simulation, voltage drops, short-circuit currents

Wprowadzenie

Zastosowanie źródeł odnawialnych staje się coraz powszechniej stosowanym sposobem pozyskiwania energii. Ma to związek ze wzrostem cen energii i propagowaniem ekologicznego stylu życia. Dodatkowy wzrost zainteresowania tą dziedziną jest spowodowany możliwością kryzysu energetycznego w perspektywie najbliższych lat.

Źródła odnawialne o niewielkiej mocy są coraz częściej wykorzystywane w gospodarstwach domowych. Jeśli ilość produkowanej energii przekracza potrzeby właściciela, stara się on o umożliwienie sprzedaży energii do sieci. Elektrownie takie włączane są do sieci nN, a zatem bardzo blisko odbiorców. Dlatego pomimo małych mocy, mogą one znacząco wpływać na warunki zasilania odbiorników i parametry dostarczanej energii.

Generacja rozproszona pozwala zwiększyć bezpieczeństwo dostaw energii elektrycznej. Z drugiej strony rodzi nowe wyzwania w dziedzinie sterowania pracą systemu i zapewnienia stabilności jego działania [3]. Mogą wystąpić problemy z zapewnieniem odpowiedniej jakości energii. Aby przyłączyć nową elektrownię do systemu, przed uzyskaniem tzw. warunków przyłączenia, trzeba ocenić wpływ takiej elektrowni na sieć tzn. przewidzieć, jak zmienią się poszczególne parametry sieci po włączeniu lub wyłączeniu elektrowni. Wymaga to dokonania analizy pracy układu zasilającego, zachowania generatorów, poprawności doboru zabezpieczeń, oceny niebezpieczeństwa wywołania migotania światła czy generowania harmonicznych [6, 10].

Analizy takie tradycyjnie wykonano w oparciu o metody quasi-statyczne (obliczenia kalkulatorowe), pozwalające wyznaczyć wartości prądów i spadków napięć w stanie ustalonym czy też maksymalną lub minimalną wartość prądu zwarcia. Podobne badania można wykonać, wykorzystując programy do modelowania elementów systemu elektroenergetycznego. Do tego typu programów należą pakiety ATP/EMTP, EMTP-RV, PSCAD czy Power Factory (PF). Wszystkie z wymienionych pakietów wyposażone są obecnie w graficzny interfejs użytkownika. Po uruchomieniu programu widoczna jest tablica z symbolami popularnych urządzeń pracujących w systemie, takich jak linie, transformatory, generatory, silniki, łączniki czy odbiorniki. Symbole są skojarzone z matematycznymi modelami tych urządzeń. Wykorzystując interfejs graficzny buduje się model układu sieciowego, a następnie wprowadza dane wszystkich elementów. Utworzony model

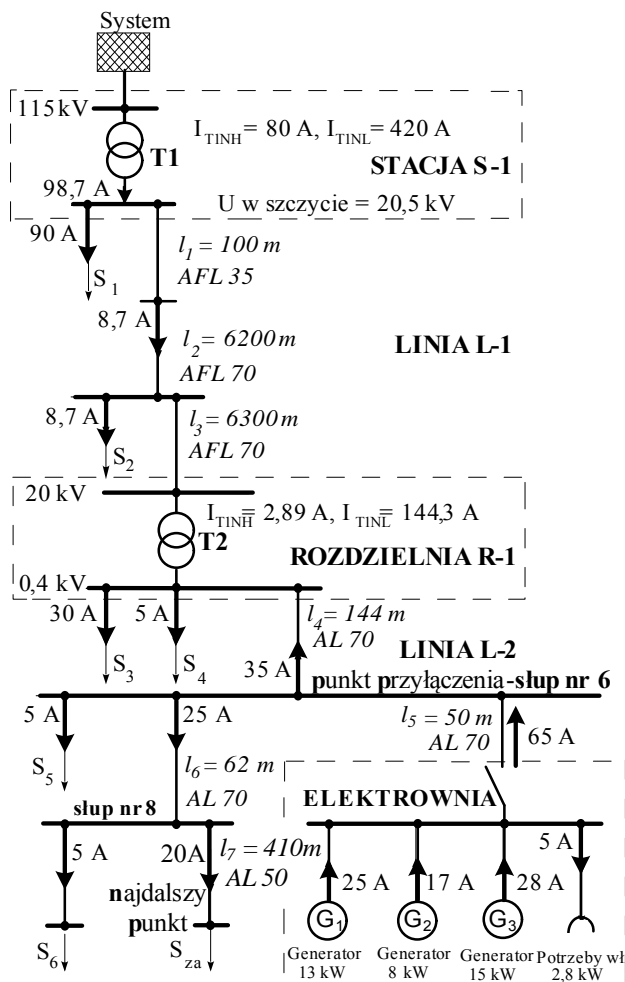
umożliwia symulowanie zaprogramowanych stanów pracy wycinka systemu. Przykładowo można symulować załączanie generatorów, rozruch silników, zmiany obciążenia czy zwarcia w wyznaczonych punktach układu. Zaletą takiej analizy jest możliwość podejścia dynamicznego – uzyskiwania przebiegów czasowych modelowanych zmiennych w stanach niestabilnych.

W artykule [7] przedstawiono wyniki analizy pracy przykładowego układu sieciowego metodami statycznymi. Obecny artykuł dotyczy tego samego wycinka sieci. Zmieniono tylko rodzaj turbin napędzających generatory z wodnych na wiatrowe. Analizowano pracę układu wykorzystując modele wykonane z zastosowaniem popularnego programu ATP/EMTP oraz PF.

Parametry modelowanej sieci

Schemat sieci przedstawiono na rysunku 1. Analizowany układ sieciowy zasilany jest z systemu na poziomie 110 kV. Transformator T1 o mocy 16 MVA, obniża napięcie na poziom 20 kV i zasila linię napowietrzną L-1 oraz inne linie, które są reprezentowane przez odbiornik S₁ (linia 20 kV). Linia L-1 składa się z 3 odcinków l₁, l₂ i l₃. Pierwsze dwa różnią się przekrojem przewodów. Między odcinkami l₂ a l₃ odchodzi odpływ, przedstawiony jako odbiornik S₂. Linia L-1 zasila transformator T2 o mocy 100 kVA, który obniża napięcie do poziomu 0,4 kV. Z rozdzielni R-1 odchodzi linia L-2 oraz inne linie, które uwzględniono jako odbiorniki S₃ i S₄. Punktem przyłączenia elektrowni odnawialnej do linii L-2 jest słup nr 6. Z tego samego słupa zasilony jest odbiornik S₅ oraz dalszy odcinek linii L-2, oznaczony l₆. Ze słupa nr 8 poprowadzone jest przyłącze do odbiornika S₆ oraz kolejny odcinek l₇ linii L-2. Z najdalszego punktu tej linii zasilanie jest doprowadzone do grupy kilku odbiorników zastąpionych jednym zastępczym, oznaczonym S_{za}.

Elektrownia wiatrowa składa się z 3 generatorów indukcyjnych o mocach 13, 8 i 15 kW oraz odbiorników potrzeb własnych. Elektrownia połączona jest z siecią krótkim odcinkiem linii l₅. Analizowano pracę układu z załączoną i wyłączoną elektrownią w szczycie obciążenia sieci. Na rys 1 przedstawiono rozpyły prądów w układzie podczas pracy elektrowni, uzyskany z obliczeń statycznych, przy założeniu, że współczynniki mocy wszystkich odbiorników są jednakowe i wynoszą $\cos \varphi = 0,8$ [7].

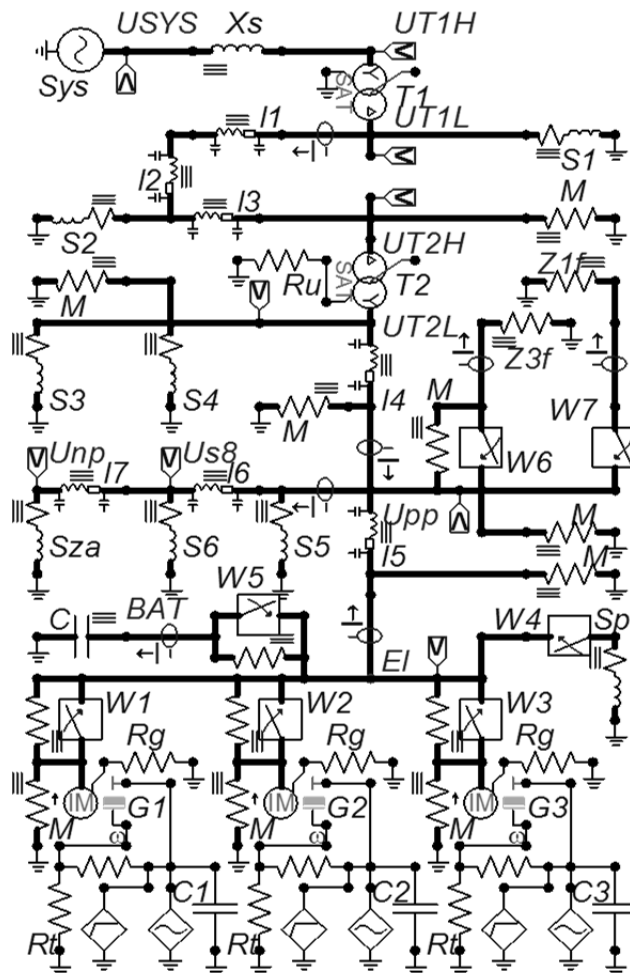


Rys. 1. Schemat układu zasilania elektrowni z zaznaczonym rozplywem prądów dla przypadku, gdy elektrownia pracuje pełną mocą przy szczytowym obciążeniu sieci

Model utworzony przy pomocy programu ATP/EMTP

Program opisano w [1, 9], a tworzenie modeli w [5, 8, 11, 12]. Opracowany model układu sieciowego przedstawiono na rys. 2. Rezystory oznaczone symbolami M mają duże wartości, aby przepływający przez nie prąd był pomijalnie mały. W izolowanej sieci 20 kV rezystory te zapewniają połączenie sieci z ziemią, co jest wymagane dla poprawnego działania programu. Natomiast w sieci 0,4 kV obecność rezystorów poprawia stabilność rozwiązywania równań modelu. Wyłącznik W1 umożliwia zamodelowanie zwarcia trójfazowego (przez rezystor 0,01 Ω) w punkcie przyłączenia elektrowni (PP). Wyłącznik W2 służy do wykonania zwarcia jednofazowego (przez rezystor 0,05 Ω). Wyłącznik Wb łączy baterię do kompensacji mocy biernej maszyn. Odbiorniki potrzeb własnych elektrowni łączy się łącznikiem W3. Rezystancję uziomu uzwojenia gwiazdowego transformatora T2 przyjęto 0,1 Ω. Transformatory zamodelowano członami SATTRAFO, z uwzględnieniem charakterystyk magnesowania.

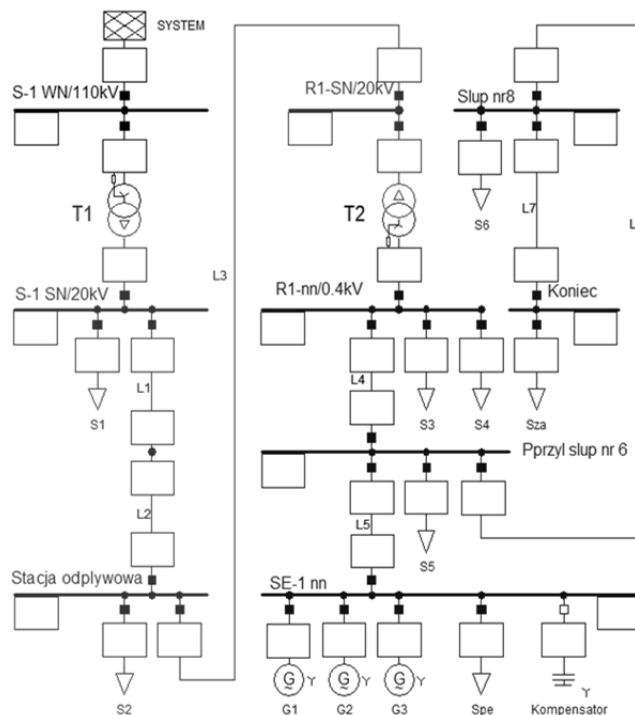
Podczas uruchamiania symulacji wystąpiły trudności z modelowaniem pracy 3 maszyn indukcyjnych przyłączonych do wspólnych szyn elektrowni. Aby model poprawnie pracował, wykorzystano modele silników z automatycznym wyliczaniem warunków początkowych. Zgodnie z zaleceniami podanymi w [11], do obwodów wirników wprowadzono dodatkowe źródła prądu zmiennego o bardzo małej amplitudzie. Przebiegi momentów turbin napędzających generatory odwzorowano zmianami parametrów źródeł prądu stałego, przyłączonych do obwodów wirników maszyn.



Rys. 2. Schemat modelu układu sieciowego wykonany z zastosowaniem programu ATP

Model w środowisku POWER FACTORY

Program Power Factory firmy DigSILENT opisano w [2]. Schemat modelu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat modelu układu sieciowego wykonany z zastosowaniem programu PF

Parametry schematu zastępczego maszyn przyjęto identyczne jak w programie ATP. Turbiny są napędzane założonymi przebiegami zmian prędkości wiatru. Proces tworzenia modelu w PF przebiega inaczej niż w ATP – zaczyna się od tzw. terminali (szyn) i dopiero pomiędzy nie wstawia się elementy schematu.

Porównanie wyników obliczeń

Obliczenia metodami statycznymi wykonano wykorzystując wzory zebrane w [4]. Dla przykładu spadki napięcia w stanie ustalonym dla układów o charakterze indukcyjnym wyznaczano z zależności:

$$(1) \Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot 100}{U_N} I \cdot (\pm R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad [\%]$$

gdzie:

- U_N – napięcie znamionowe przewodowe [V],
- I – prąd obciążenia elementu [A],
- R, X – rezystancja i reaktancja elementu (linii, transformatora) [Ω],
- φ – kąt od prądu do napięcia na elemencie [$^\circ$] lub [rad],
- $+/_-$ – znak przy pracy silnikowej/generatorowej maszyn.

W przypadku programu ATP obliczono przebiegi wartości chwilowych napięcia w poszczególnych punktach sieci, następnie powiększono wybrane fragmenty przebiegów i wykorzystując znacznik, odczytywano wartości i wyliczano spadki napięcia. W transformatorach napięcia sprowadzono do wspólnego poziomu, wykorzystując rzeczywistą przekładnię napięciową. Program Power Factory wyświetla ustalone wartości skuteczne napięć po wykonaniu obliczeń warunków początkowych lub rozplywu prądów.

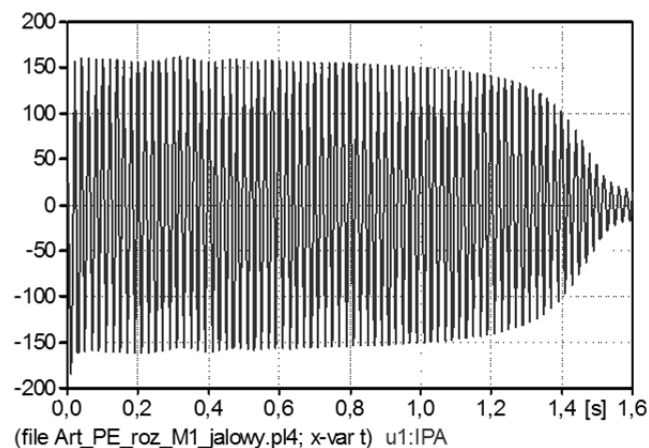
Wartości napięć w węzłach układu i spadki napięcia uzyskane poszczególnymi metodami zebrano w tabeli 1. Porównano warianty gdy elektrownia jest wyłączona oraz gdy maszyny pracują jako silniki lub jako generatory z wyłączoną lub załączoną baterią kondensatorów. Spadki ΔU_{I6} wyznaczano wykorzystując napięcia U_{pp} (słup 6) oraz $U_{słup 8}$. Program PF nie pozwala bezpośrednio odczytać wartości napięcia przed reaktancją systemu ani spadku napięcia na tej reaktancji.

Wartości napięć uzyskane trzema opisanymi metodami często są do siebie zbliżone, ale w niektórych wypadkach występują dość znaczne różnice.

Tab. 1. Wyniki obliczeń napięć i spadków napięć w szczycie obciążenia, uzyskane różnymi metodami

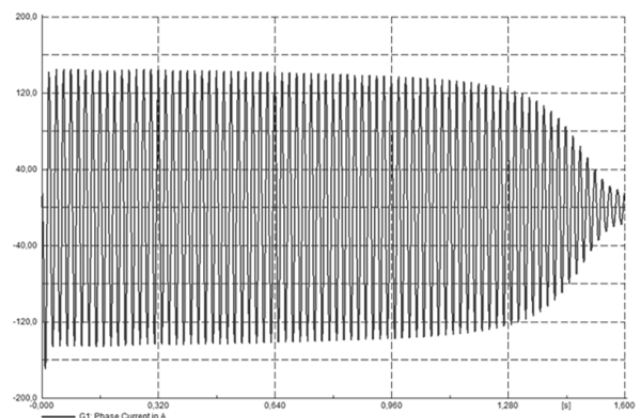
Metoda obl. Punkt	Obl. statyczne			Model w ATP					Model w PF				
	el. wył.	gen. zał.	pr. sil.	el. wył.	gen. zał.	gen. zał. +bat.	pr. sil.	pr. sil. +bat.	el. wył.	gen. zał.	gen. zał. +bat.	pr. sil.	pr. sil. +bat.
U_{sys} [kV]	109,711	109,678	109,744	109,721	109,721	109,721	109,721	109,721					
ΔU_s [%]	0,28	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29					
U_{T1H} [kV]	<u>109,403</u>	109,381	109,436	<u>109,403</u>	109,399	109,402	109,399	109,402	<u>109,403</u>	109,403	109,403	109,403	109,403
ΔU_{T1} [%]	1,84	1,82	1,87	1,80	1,87	1,85	1,88	1,86	1,21	1,23	1,21	1,23	1,21
U_{T1L} [kV]	20,500	20,500	20,500	20,508	20,492	20,497	20,491	20,496	20,633	20,629	20,633	20,628	20,632
$\Delta U_{I1 I2 I3}$ [%]	0,36	0,28	0,45	0,43	0,36	0,33	0,46	0,43	0,36	0,36	0,32	0,45	0,42
U_{T2H} [kV]	20,428	20,444	20,410	20,422	20,419	20,430	20,399	20,409	20,560	20,557	20,568	20,538	20,547
ΔU_{T2} [%]	1,83	0,00	3,88	1,93	2,39	1,40	3,82	2,92	1,97	2,46	1,41	3,81	2,91
U_{T2L} [V]	401,2	408,9	392,7	400,7	398,8	403,0	392,7	396,5	403,3	401,3	405,7	395,5	399,3
ΔU_{I4} [%]	1,05	- 0,23	3,60	1,02	0,82	0,00	3,50	2,67	1,05	0,87	- 0,02	3,42	2,57
U_{pp} (słup 6) [V]	397,0	409,8	378,3	396,6	395,5	403,0	378,7	385,8	399,1	397,8	405,8	381,8	389,0
ΔU_{I5} [%]	0,00	- 0,15	0,17	0,00	- 0,10	- 0,40	0,87	0,57	0,00	- 0,25	- 1,07	2,35	1,52
U_{ELEKTR} [V]	397,0	410,4	377,6	396,6	395,8	404,5	375,2	383,5	399,1	398,8	410,1	372,4	382,9
ΔU_{I6} [%]	0,37	0,37	0,37	0,37	0,35	0,35	0,37	0,35	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
$U_{słup 8}$ [V]	395,5	408,3	376,8	395,1	394,1	401,6	377,3	384,4	397,6	396,3	404,3	380,3	387,5
ΔU_{I7} [%]	2,55	2,55	2,55	2,45	2,45	2,50	2,35	2,37	2,52	2,52	2,55	2,52	2,55
U_{np} [V]	385,3	398,1	366,6	385,3	384,3	391,6	367,9	374,9	387,5	386,2	394,1	370,2	377,3

Programy ATP i PF umożliwiają symulowanie przebiegu stanów dynamicznych. Na rys. 4 i 5 przedstawiono przykładowe przebiegi prądu podczas silnikowego rozruchu maszyny 1 na biegu jałowym (bezwładność $C_1=61 \cdot 10^7 \mu S$).



Rys. 4. Prąd silnikowego rozruchu G1 uzyskany z modelu w ATP

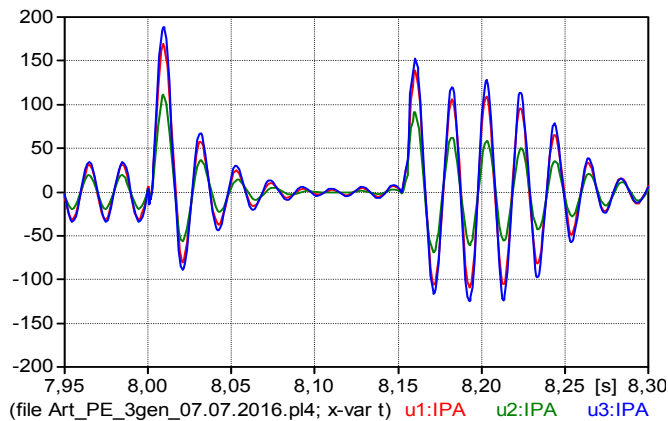
Pierwsza (ujemna) amplituda prądu z modelu w ATP wynosi 184,5 A, a z modelu w PF 170,0 A. A zatem wartości skuteczne prądu początkowego to 130,5 z ATP i 120,2 A z PF, a wg. wzorów statycznych 110,2 A.



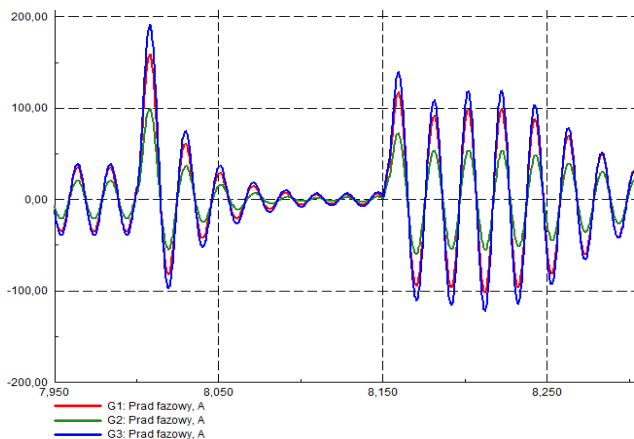
Rys. 5. Prąd silnikowego rozruchu G1 uzyskany z modelu w PF

Modelowanie zwarcia trójfazowego

Modelowano zwarcie trójfazowe w punkcie przyłączenia elektrowni. Zwarcie wystąpiło w chwili 8,0 s, a zostało wyłączone po 0,15 s. Na rys. 6 przedstawiono wartości chwilowe prądów dopływających do miejsca zwarcia od generatorów uzyskane z ATP, a na rys. 7 z PF.

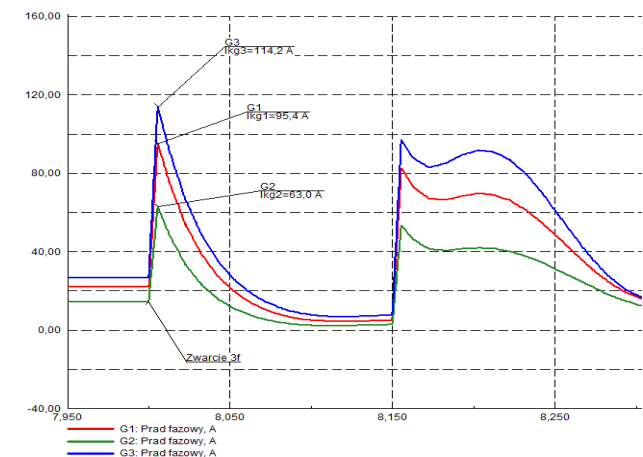


Rys. 6. Prąd zwarcia 3-fazowego płynący od generatorów, uzyskany z modelu w ATP



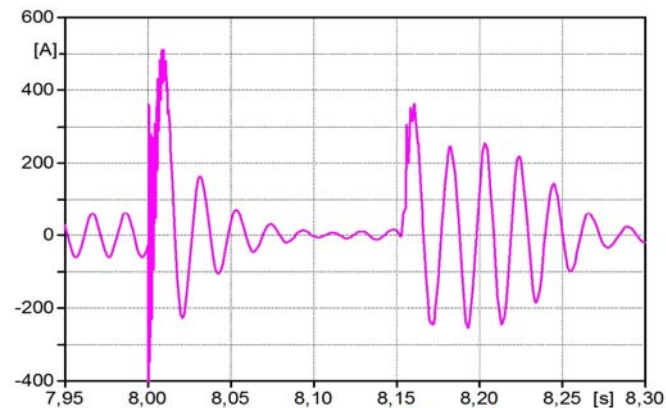
Rys. 7. Prąd zwarcia 3-fazowego płynący od generatorów, uzyskany z modelu w PF

Przeliczając maksymalne amplitudy prądu zwarcia od poszczególnych generatorów uzyskane z programu ATP na wartości skuteczne uzyskano wartości 119,5, 78,7 i 133,4 A. Program PF umożliwia wykreślenie przebiegów wartości skutecznych prądów zwarciovych generatorów (rys. 8). Maksymalne wartości tych prądów to 95,4, 63,0 i 114,2 A. Metodą statyczną uzyskano odpowiednio 110, 77 i 137,5 A.

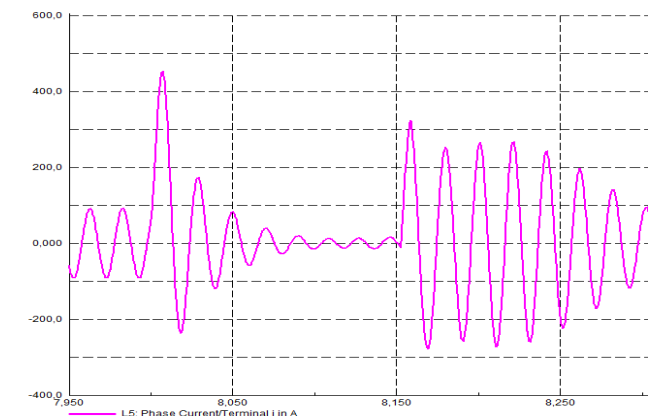


Rys. 8. Prądy zwarciovych poszczególnych generatorów uzyskane z PF

Całkowity prąd zwarciovych płynący od elektrowni uzyskany z ATP przedstawia rys. 9, a z PF 10. Prąd ten jest większy od sumy prądów 3 generatorów wg rys. 6 lub 7, gdyż miejsce zwarcia jest dodatkowo zasilane przez baterię kondensatorów. W przebiegach obliczonych przy pomocy ATP, zaraz po wystąpieniu zwarcia pojawiły się składowe, powodujące chwilową zmianę znaku prądu.

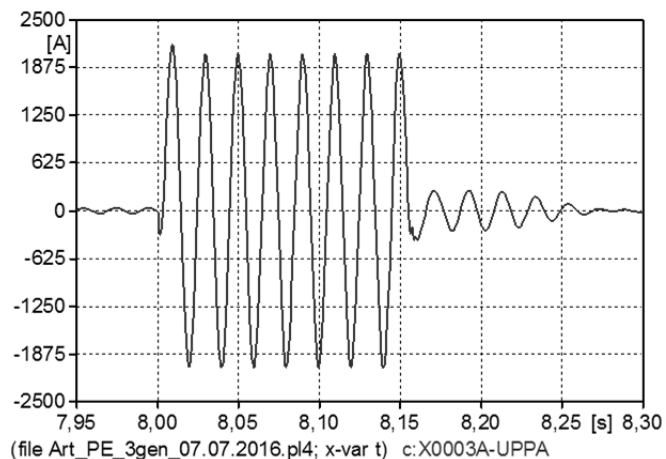


Rys. 9. Prąd dopływający do miejsca zwarcia od elektrowni obliczony z ATP

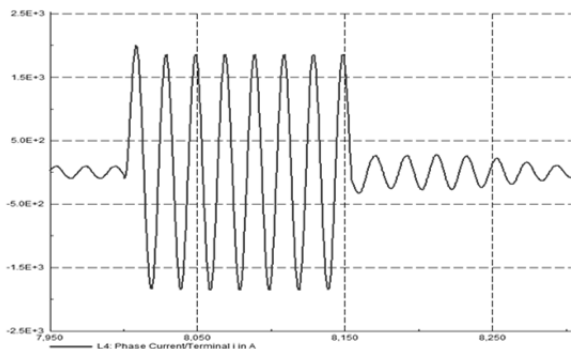


Rys. 10. Prąd dopływający do miejsca zwarcia od elektrowni obliczony w PF

Przebiegi prądu dopływającego do miejsca zwarcia 3-fazowego od strony systemu przedstawiono na rysunkach 11 i 12. Maksymalna amplituda, przeliczona na wartość skuteczną, uzyskana z ATP to 1536 A, a ustalony prąd zwarciovych 1448 A (rys. 11). Natomiast z PF uzyskano prąd ustalony na poziomie 1459 A (rys. 12). Największa wartość prądu od systemu wg. metody statycznej wynosiła 1498 A.



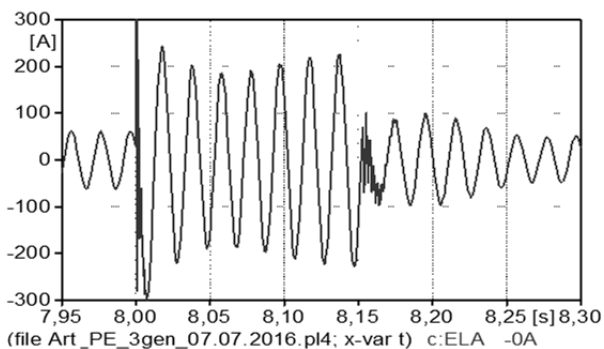
Rys. 11. Prąd zwarcia 3f dopływający od systemu, obliczony w ATP



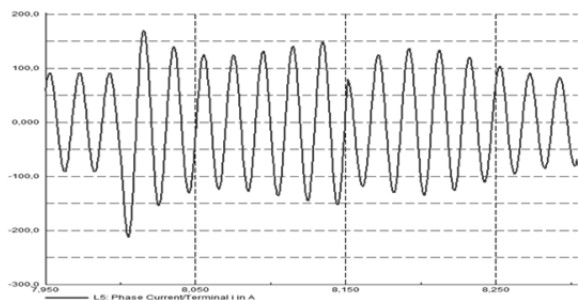
Rys. 12. Prąd zwarcia 3f dopływający od systemu – obliczony w PF

Modelowanie zwarcia jednofazowego

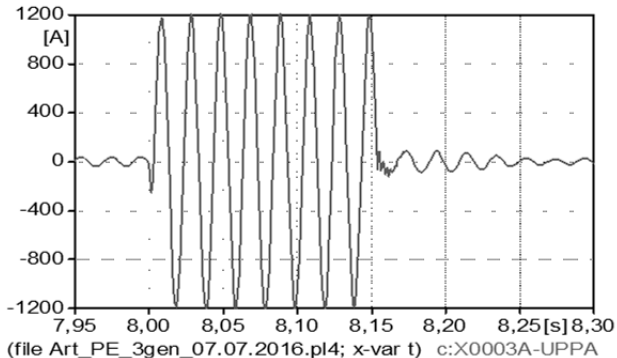
Kolejnym porównywanym przypadkiem były wyniki symulowania zwarcia jednofazowego w punkcie przyłączenia elektrowni. Z modelu w ATP pierwsza wartość amplitudy prądu od wszystkich generatorów przeliczona na skuteczną wynosi 212 A (rys. 13), a największa wartość skuteczna od systemu 863 A (rys. 15). Obliczenia w programie PF dały odpowiednio 142,9 i 876,5 A (rys. 14 i 16). Wg obliczeń statycznych prąd od systemu to 868 A.



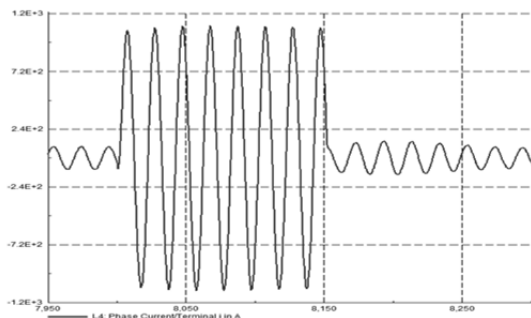
Rys. 13. Prąd zwarcia 1-fazowego płynący od generatorów, uzyskany z modelu w ATP



Rys. 14. Prąd zwarcia 1f dopływający od generatorów – z PF



Rys. 15. Prąd zwarcia 1f dopływający od systemu – z ATP



Rys. 16. Prąd zwarcia jednofazowego dopływający do miejsca zwarcia obliczony w PF

Podsumowanie

Wyniki uzyskiwane trzema porównywanymi metodami są zbliżone, jednak w pewnych przypadkach pojawiają się dość znaczne różnice. Jest to szczególnie zaskakujące w odniesieniu do programów symulacyjnych, gdyż wydaje się, że modele elementów systemu wykorzystywane przez oba programy są podobnej klasy. Niekiedy przy posługiwaniu się powszechnie akceptowanym programem ATP pojawiają się problemy. Np. w modelu z rys. 2 konieczne było obniżenie rezystancji uziemiających stojany silników do wartości 10 kΩ. Przy 100 kΩ równania były niestabilne. Znaczącymi zaletami ATP są powszechna dostępność i duża liczba prac z jego zastosowaniem. Należy jednak pamiętać, że w każdym wypadku obliczenia wymagają logicznej oceny poprawności wyników. Pozwala to wyeliminować nieprawidłowości w symulowanych przebiegach lub przynajmniej oszacować ewentualne przekłamania.

Autorzy: Dr hab. inż. Bogusław Karolewski, prof. nadzw., Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: boguslaw.karolewski@pwr.edu.pl
Mgr inż. Paweł Urbański, absolwent Wydziału Elektrycznego PWR, młodszy specjalista ds. Zabezpieczeń i Telemechaniki, APATOR ELKOMTECH S.A., 93-569 Łódź, Wołowa 2c

LITERATURA

- [1] ATP-EMTP Rule Book. Canadian/American EMTP User Group, 1987-92
- [2] DlgSILENT PowerFactory. User's Manual. Version 14.0, 2008
- [3] Kacejko P: Generacja rozproszona w systemie elektroenergetycznym. Wyd. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004
- [4] Karolewski B, Ligocki P: Analiza połączenia małej elektrowni wodnej z systemem elektroenergetycznym. Wiadomości Elektrotechniczne 2005, nr 5
- [5] Karolewski B: Tworzenie modelu sieci zakładowej w programie EMTP. Pr. Nauk. Inst. Maszyn, Napędów i Pom. Elektr. Polit. Wrocławskiej 2009, nr 63, Studia i Mater. nr 29
- [6] Karolewski B: Wpływ małej elektrowni na sieć. Wiadomości Elektrotechniczne 2012 nr 8
- [7] Karolewski B: Przyłączanie małej elektrowni wodnej do sieci. Przegląd Elektrotechniczny 2013, nr 08
- [8] Uracz P, Karolewski B: Modelowanie stanów przejściowych w sieciach energetycznych z wykorzystaniem programu ATP/EMTP. Prace Nauk. Inst. Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej 2005, nr 58, Studia i Materiały nr 25
- [9] Prikler L, Hoiden H. K: ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista Users' Manual
- [10] Rasolomampionona D, Raison B, Banaszek A: Metody wykrywania pracy wyspowej i ich implementacja w symulacji i modelu rzeczywistym, cz. I i II. Przegląd Elektrotechniczny 2009, nr 8
- [11] Rosołowski E: Komputerowe metody analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009
- [12] Wiater J: Komputerowe obliczenia w elektrotechnice. Dom Wyd. MEDIUM, Warszawa 2012