

MODELOWANIE I ANALIZA PRZEPIĘĆ BARDZO SZYBKOSMIENNYCH W ELEKTROENERGETYCZNYCH STACJACH WYSOKIEGO NAPIĘCIA IZOLOWANYCH GAZEM SF₆

Radosław RACZEK¹, Piotr PAJĄK²

1. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
tel.: 889 653 218 e-mail: radoslaw.raczek@gmail.com
2. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
tel: 12 617 44 16 e-mail: ppajak@agh.edu.pl

Streszczenie: W systemach elektroenergetycznych dla celów przesyłowych i dystrybucyjnych szerokie zastosowanie znalazły stacje izolowane gazem SF₆ (ang. Gas Insulated Substations – GIS). Podlegają one narażeniom podczas występowania przepięć bardzo szybkozmiennych (ang. Very Fast Transient Overvoltages – VFTO). Generowana w wyniku łączenia styków odłącznika fala przepięciowa naraża układy izolacyjne oraz aparaturę w rozdzielni gazowej GIS. W artykule zostaną przedstawione zasady modelowania zjawisk przejściowych oraz wyniki symulacji komputerowych dla operacji zamykania odłącznika zainstalowanego w stacji GIS. Obliczenia zostaną przeprowadzone z wykorzystaniem programu Electromagnetics Transients Program – Alternative Transients Program (EMTP–ATP). Wyniki symulacji pozwolą na określenie maksymalnych wartości szczytowych przepięć, ich stromości oraz częstotliwości.

Słowa kluczowe: przepięcia bardzo szybkozmiennne, stacja izolowana gazem SF₆, odłącznik, EMTP–ATP modelowanie, symulacje komputerowe.

1. WPROWADZENIE

Przepięcia udarowe o bardzo stromym czole (VFTO) generowane są w trakcie wykonywania operacji łączeniowych, bądź w wyniku przeskoków w urządzeniach szczelnie osłoniętych z izolacją gazową w postaci sześćfluorku siarki (SF₆).

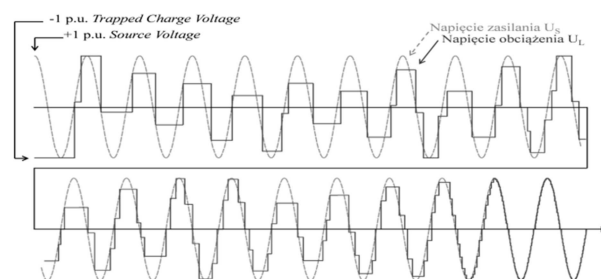
W artykule przedstawiono wyniki symulacji przepięć łączeniowych, otrzymane dla rozdzielni gazowej GIS pracującej na napięciu 420 kV wraz z wchodzącymi w jej skład urządzeniami elektroenergetycznymi. W celu uzyskania przebiegów przepięć w określonych punktach pomiarowych, został przygotowany model odzwierciedlający rzeczywistą stację gazową wysokiego napięcia [1]. Do obliczeń zastosowano program komputerowy Electromagnetic Transients Program – Alternative Transients Program.

2. MODELOWANIE PRZEPIĘĆ W ROZDZIELNIACH IZOLOWANYCH GAZEM SF₆

2.1. Mechanizm generacji przepięć podczas czynności łączeniowych prowadzonych w rozdzielni GIS

Podczas czynności łączeniowych wykonywanych za pomocą odłącznika, pomiędzy jego stykami dochodzi do wielokrotnego zapalania się łuku elektrycznego, co jest

wynikiem stosunkowo wolnego łączenia się styków odłącznika. Prace manewrowe wykonywane na stacji, polegające na odłączaniu i załączaniu pojemności obciążenia (rys. 1), prowadzą do utrzymywania się napięcia określanego mianem Trapped Charge Voltage (TCV) [2].



Rys. 1. Zmiana napięcia obciążenia U_L i napięcia źródła U_s podczas czynności łączeniowych odłącznika – załączenie pojemności obciążenia [3]

W analizach VFTO dla oceny koordynacji izolacji wyznaczany jest najgorszy przypadek z całego procesu łączeniowego. Ma on miejsce dla napięcia TCV równego -1 p.u. oraz +1 p.u. wartości napięcia zasilającego (ang. Source Voltage). Wówczas napięcie pomiędzy stykami odłącznika Δu osiąga wartość 2 p.u. [4].

Do przeprowadzenia analizy VFTO konieczne jest wyznaczenie nieliniowej rezystancji łuku elektrycznego podczas zamykania styków odłącznika zgodnie ze wzorem (1) [2]:

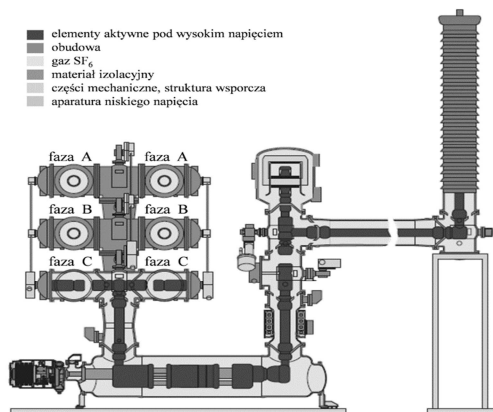
$$R(t) = R_a + R_o \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

gdzie: R_a – rezystancja łuku po przepięciu, $R_a = 0,5 \Omega$,
 R_o – rezystancja przerwy powietrznej, $R_o = 10^{12} \Omega$,
 τ – stała czasowa, $\tau = 0,6 \cdot 10^{-9} \text{ s}$.

Zależność (1) opisuje malejącą funkcję wykładniczą rezystancji $R(t)$ od wartości 1 T Ω do wartości bliskich zero.

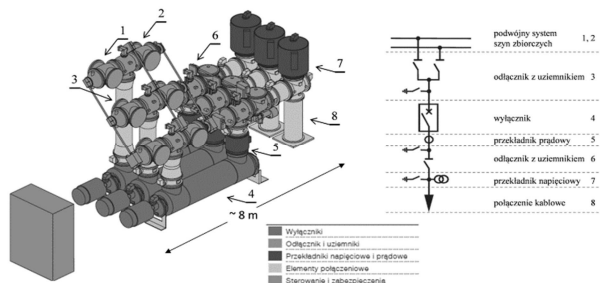
2.2. Opis urządzeń zainstalowanych w stacji gazowej SF₆

W niniejszym artykule została przeprowadzona analiza przepięć bardzo szybkozmiennych VFTO dla rozdzielni GIS o napięciu znamionowym $U_N = 420 \text{ kV}$, której podzespoły są izolowane gazem – sześćfluorkiem siarki (SF₆). Wygląd tej rozdzielni przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny rozdzielnicy GIS o napięciu znamionowym $U_N = 420$ kV [1]

Dzięki informacjom o miejscu zainstalowania oraz typie aparatu elektrycznego, możliwe jest wykreślenie schematu elektrycznego opisującego połączenia między urządzeniami, który przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Pole liniowe kablowe rozdzielnicy GIS 420 kV wraz z ekwiwalentnym schematem elektrycznym [1, 5]

3. MODELE CYFROWE URZĄDZEŃ ELEKTROENERGETYCZNYCH

3.1. Zasady modelowania poszczególnych elementów analizowanej stacji GIS 420 kV

Przebiegi VFTO charakteryzują się czasem narastania czoła w granicach od 4 ns do 10 ns. Z tego powodu, części składowe w modelu symulacyjnym, zostały przyjęte jako liniowe elementy skupione oraz elementy rozproszone. Definiowane są one przez atrybuty: impedancję falową Z , prędkość rozchodzenia się fali v oraz długość szyny zbiorczej/aparatu elektroenergetycznego l , a ich wartości przyjęto zgodnie z [3,6]. Wymienione parametry urządzeń zostały zestawione w tablicy 1.

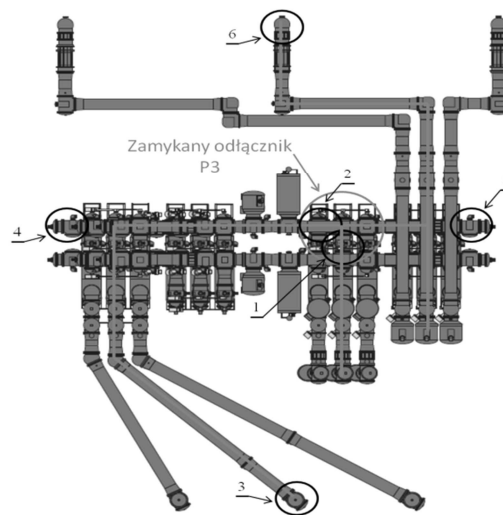
Tablica 1. Dane aparatów elektroenergetycznych w rozdzielni GIS do analizy VFTO [3,6]

Element	Parametry
Przewód szynowy	$Z = 113 \Omega$, $v = 290$ m/ μ s $l = 1,1 - 15$ m wg rysunku 3 i 4
Odłącznik/ wyłącznik otwarty, uziemnik	$C = 4$ pF
Odłącznik podczas zamykania	$R(t) = R_a + R_o \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ $R_a = 0,5 \Omega$, $R_o = 10^{12} \Omega$ $\tau = 0,6 \cdot 10^{-9}$ s
Wyłącznik zamknięty	$Z = 60 \Omega$, $v = 290$ m/ μ s $l = 4$ m wg rysunku 3
Przekładnik prądowy	$Z = 42 \Omega$, $v = 290$ m/ μ s $l = 0,8$ m wg rysunku 3
Przekładnik napięciowy	$C = 300$ pF

Linia kablowa WN	$Z = 30 \Omega$, $v = 165$ m/ μ s $l = 5$ m wg rysunku 3 i 4
Długa linia napowietrzna	$Z = 300 \Omega$
Transformator	$C = 2$ nF

3.2. Schemat modelowy stacji GIS 420 kV

Do analizy przebiegów bardzo szybkozmiennych został wykorzystany typowy układ stacji w izolacji gazowej SF₆ na napięcie 420 kV [1]. Rozdzielnia ta zbudowana jest z następujących segmentów: podwójnego układu szyn zbiorczych; dwóch pól liniowych (napowietrznego i kablowego); pola transformatorowego; pola łącznikowego (sprzęgłowego) szyn zbiorczych (rys. 4).



Rys. 4. Układ analizowanej stacji GIS 420 kV [1] wraz z zaznaczonymi punktami pomiaru napięcia:

- 1 – odłącznik (strona obciążenia), 2 – odłącznik (strona zasilania),
- 3 – przepust SF₆ - powietrze, 4 – szyna północna w polu napowietrznym, 5 – szyna północna w polu transformatorowym, 6 – przyłącze transformatorowe

4. SYMULACJE PRZEPIĘĆ ŁĄCZENIOWYCH W ROZDZIELNIACH GIS 420 kV

Zgodnie z zaleceniami przedstawionymi w [7] zostały wykonane obliczenia dla najgorszego przypadku, w którym to system elektroenergetyczny (SEE) pracuje na maksymalnej dozwolonej wartości napięcia (420 kV), a podczas wykonywania czynności łączeniowej po stronie zasilania napięcie osiąga wartość maksymalną (+1 p.u.). Jako drugi przypadek do obliczeń przebiegów, zostały wykonane symulacje przy wartości TCV na poziomie -0,5 p.u [8]. Wymienione wartości szczytowe napięcia znamionowego w jednostkach względnych (p.u.) obliczono zgodnie z zależnością (2):

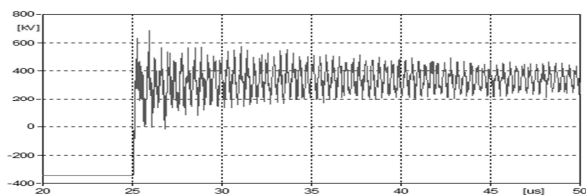
$$1 \text{ p.u.} = 420 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 342,9 \text{ kV} \quad (2)$$

Symulacje przeprowadzono zatem dla dwóch wartości napięcia po stronie obciążenia odłącznika [7]:

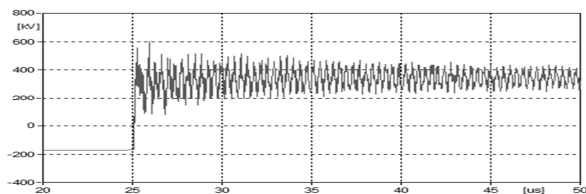
- przypadek 1: $U_{TC} = -1$ p.u. = -342,9 kV
 - przypadek 2: $U_{TC} = -0,5$ p.u. = -171,45 kV.
- W polu liniowym kablowym odłącznik zamykany jest po czasie $t = 25 \mu$ s. Dla całej symulacji przyjęto czas $T_{max} = 50 \mu$ s, o kroku czasowym równym $\Delta t = 0,1$ ns. Analizie zostały poddane przebiegi łączeniowe generowane w wybranych punktach pomiaru napięcia, zaznaczonych na rysunku 4.

4.1. Przebiegi prądów

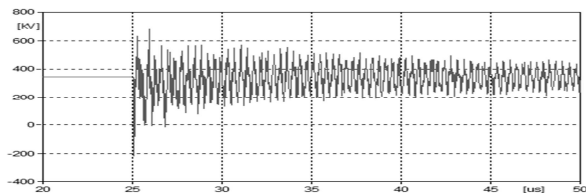
Symulacje dla dwóch wartości napięcia U_{TC} , pozwoliły na wykreślenie przebiegów prądów łączeniowych w wybranych punktach pomiarowych w stacji GIS. Zostały one zilustrowane na rysunkach nr 5, 7 i 9 dla przypadku nr 1 oraz na rysunkach nr 6, 8 i 10 dla przypadku nr 2.



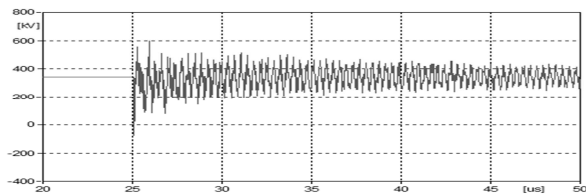
Rys. 5. Odłącznik (strona obciążenia) – pkt. 1, $U_{TC} = -1$ p.u.



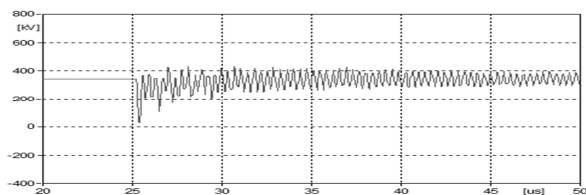
Rys. 6. Odłącznik (strona obciążenia) – pkt. 1, $U_{TC} = -0,5$ p.u.



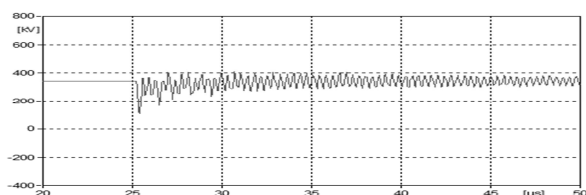
Rys. 7. Odłącznik (strona zasilania) – pkt. 2, $U_{TC} = -1$ p.u.



Rys. 8. Odłącznik (strona zasilania) – pkt. 2, $U_{TC} = -0,5$ p.u.



Rys. 9. Przyłącze transformatorowe – pkt. 6, $U_{TC} = -1$ p.u.



Rys. 10. Przyłącze transformatorowe – pkt. 6, $U_{TC} = -0,5$ p.u.

4.2. Poziom prąd łączeniowych

Z zamieszczonych w punkcie 4.1 przebiegów, odczytano maksymalne wartości szczytowe prądów w kilowoltach, a następnie przeliczono je na jednostki

względne. Dodatkowo obliczono różnicę procentową pomiędzy dwoma przypadkami na podstawie równania (3) [7]:

$$\Delta\% = \frac{U_{p1} - U_{p2}}{U_{p1}} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie: U_{p1}, U_{p2} – wartość napięcia dla przypadku nr 1 i 2.

Otrzymane wartości zostały przedstawione w tabelicy 2, a następnie porównane z poziomem wytrzymałości napięciowej podczas czynności łączeniowych określonej jako SIWL (ang. Switching Impulse Withstand Level). Dla SEE o napięciu znamionowym 420 kV określono według normy IEC [9] poziom SIWL na 1050 kV.

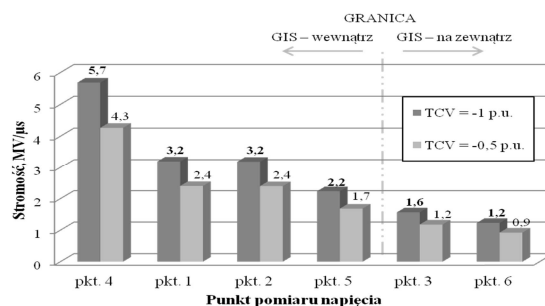
Tabela 2. Zbiorcze wyniki przeprowadzonej symulacji dla analizy VFTO rozdzielni GIS 420 kV [7]

Punkt pomiaru napięcia według rysunku 4	Napięcie U_{TC}		Maks. wartość przebiegu		87 % SIWL
	p.u.	kV	p.u.	kV	kV
Odłącznik (strona obciążenia) – pkt. 1	-1	685	2,00		913
	-0,5	600	1,75		
	$\Delta\%$	12,5 %			
Odłącznik (strona zasilania) – pkt. 2	-1	684	2,00		
	-0,5	599	1,75		
	$\Delta\%$	12,5 %			
Przepust SF ₆ -powietrze – pkt. 3	-1	468	1,36		
	-0,5	437	1,27		
	$\Delta\%$	6,7 %			
Szczyt północna w polu napowietrznym – pkt. 4	-1	498	1,45		
	-0,5	459	1,34		
	$\Delta\%$	7,8 %			
Szczyt północna w polu transformatorowym – pkt. 5	-1	630	1,84		
	-0,5	559	1,63		
	$\Delta\%$	11,4 %			
Przyłącze transformatorowe – pkt. 6	-1	433	1,26		
	-0,5	410	1,20		
	$\Delta\%$	5,2 %			

W procesie badania koordynacji izolacji konieczne jest, aby poziom prądu nie przekraczał marginesu ok. 87% wytrzymałości SIWL, czyli wartości 913 kV [10].

4.3. Stromość prądów łączeniowych

Przeprowadzone obliczenia umożliwiły wyznaczenie maksymalnych stromość prądów dla obu przypadków napięcia ładowania TCV. Interpretacja graficzna stromość czoła fali została przedstawiona na rysunku 11.

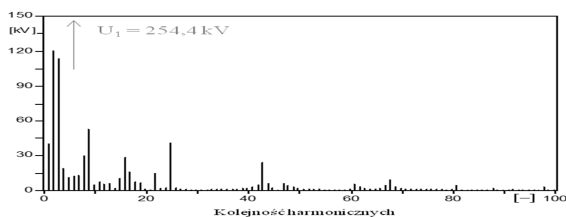


Rys. 11. Maksymalne stromość prądów w stacji GIS 420 kV

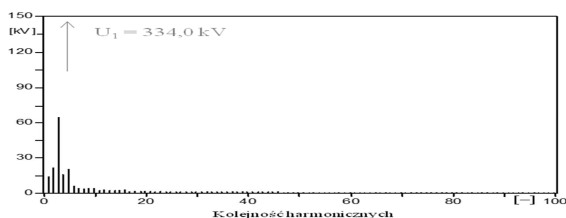
Największe stromości czoła fali przepięciowej występują wewnątrz rozdzielnicy GIS. Wartości maksymalne osiągają wówczas 5,7 MV/μs dla punktu pomiarowego nr 4 na końcu szyny zbiorczej w polu liniowym napowietrznym. Po obu stronach zamykanego odłącznika stromość wyniosła 3,2 MV/μs.

4.4. Częstotliwości prądów łączeniowych

Dla największej i najmniejszej wartości prądów zaprezentowanych na przebiegach w punkcie 4.1, zostały wyznaczone widma częstotliwościowe. Są to widma odpowiednio dla prądu w pkt.1 (rys. 12) oraz w pkt. 6 (rys. 13).



Rys. 12. Widmo częstotliwościowe dla prądu w pkt. 1



Rys. 13. Widmo częstotliwościowe dla prądu w pkt. 6

Wartość szczytowa napięcia została zaznaczona strzałką z dołączoną informacją o wartości maksymalnej prądu dla podstawowej harmonicznej (U_1) wynoszącej 1 MHz. Począwszy od podstawowej harmonicznej można zaobserwować wytlumienie kolejnych harmonicznych przebiegu.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Stany przejściowe bardzo szybkozmienne VFT są zjawiskami złożonymi i skomplikowanymi. Dokładność wyników symulacji zależy głównie od dokładności modeli cyfrowych urządzeń oraz zjawisk w warunkach generowania i propagacji prądów. Przeprowadzona analiza prądów

bardzo szybko zmiennych VFT pozwoliła na wyznaczenie wartości maksymalnych, stromości oraz częstotliwości prądów. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że największe wartości prądów występują na zaciskach zamykanego odłącznika, nie przekraczają one jednak przyjętego poziomu wytrzymałości SIWL. W konsekwencji możliwe jest zapewnienie właściwej ochrony systemu elektroenergetycznego oraz aparatury zainstalowanej w rozdzielni wysokiego napięcia.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Gas-insulated Switchgear ELK-3 GIS for maximum performance, 550 kV – product brochure *IHC0000742AGEn* (str. intern.: <http://new.abb.com>, dostęp na dzień 17.10.2017r.)
2. Olason D. L., Ebdrup T., Silva F.F., Bak C. L.: VFT insulation coordination study of a 400 kV GIS, CIGRE Belgium Conference.
3. IEEE Working Group on Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs: Modelling and Analysis Guidelines for Very Fast Transients, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, October 1996, p. 2028 – 2035.
4. Szewczyk M., Stosur M., Piasecki W., Kuczek T., Chmielewski T., Kostovic J., Riechert U.: Impact of Disconnecter Design on Insulation Co-ordination in Gas-Insulated UHV Switchgear Substations. *Przeгляд Elektrotechniczny*. R. 89 NR 8/2013, str. 35 – 38.
5. Rozdzielnicza w izolacji gazowej ELK-3 C, 420 kV – broszura 2617PL1065-W1-pl. (str. intern.: <http://new.abb.com>, dostęp na dzień 17.10.2017r.).
6. Pathak N., Bhatti T.S., Ibraheem: Study of Very Fast Transient Overvoltages and Mitigation Techniques of a Gas Insulated Substation, 2015 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies [ICCPCT]
7. Kuczek T., Florkowski M.: Modeling of overvoltages in gas insulated substations. *Przeгляд Elektrotechniczny*. R. 88 NR 4a/2012, str. 305 – 308
8. IEC 60071-4:2004, Insulation co-ordination – Part 2: Computational guide to insulation co-ordination and modeling of electrical networks
9. IEC 60071-1:2006, Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rule.
10. IEC 60071-1:1996, Insulation co-ordination – Part 2: Application guide.

MODELING AND ANALYSIS OF VERY FAST TRANSIENT OVERVOLTAGES IN HIGH VOLTAGE GAS INSULATED SUBSTATIONS

In electric power systems, for transmission and distribution purposes, gas insulated substations (GIS) are found a wide application. In case of various transient phenomena like switching operations and lightning, the GIS are subjected to the very fast transients overvoltages (VFTO). As a result of GIS disconnecter opening or closing, an electromagnetic wave is generated. Such a wave endanger insulation systems and equipment installed in the gas switchgear, including cable lines, overhead transmission lines and transformers. Overvoltages analysis for insulation coordination studies is carried out while maintaining the acceptable value of Switching Impulse Withstand Level (SIWL). This paper presents a state of the art modeling principles of transient phenomena and computer simulations results for closing operation of GIS disconnecter installed in gas insulated substation. Calculations will be conducted by using computer simulation program like Electromagnetics Transients Program – Alternative Transients Program (EMTP–ATP). Simulation results will let to determine maximum overvoltages peak values, steepness and frequency range of this overvoltages.

Keywords: very fast transient overvoltages, gas insulated substation, disconnecter, EMTP–ATP modeling, computer simulations.