

Resonant Conditions in a Node with an SVC Compensator

Author

Robert Kowalak

Keywords

SVC, resonance, reactive power

Abstract

The primary purpose of installing static shunt compensators in power grids is to improve the voltage conditions. Additional reactive power sources increase the system's voltage stability and enable faster system recovery after a voltage failure. This paper presents the impact of an SVC device's structure and settings on impedance change in the supply system, and hence on the frequencies at which resonance phenomena can develop.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2016307

1. Introduction

Power system components are characterized by large inductance, which determines the nature of the entire power supply system. The introduction to such a system of a compensator comprising capacitive elements may contribute to the excitation in the system of vibrations of a resonant nature [1, 3].

The most widespread compensators in power systems are capacitor banks and/or reactors switched on with electromechanical switches. More advanced and gradually gaining more and more importance are power electronic shunt compensators: SVC and STATCOM. Because of the speed of their regulation process these compensators also have the effect of increasing the system stability during emergency states.

This paper refers to research on methods of the selection and evaluation of new compensators' locations in the system [3, 4, 5, 10]. The selection of compensator location and its evaluation, particularly in a closed electric grid, is a complex matter [2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. It must take into account a number of factors related to the system operation and features of the introduced source of reactive power, including the threat of resonances. In a system with a power electronic compensator they depend on its structure, set-up and settings, place of installation, and the power grid configuration. The presented research results have been obtained using DlgSILENT PowerFactory® software.

2. The phenomenon of resonance

Each electrical circuit comprising capacitive and inductive elements in its structure is characterized by the frequency of so-called natural (free) vibration. There are also various elements in electrical systems that bring to the circuit currents and/or voltages with their specific frequencies – these are the sources of forced vibrations. In the case of a circuit which natural vibration frequency is the same as the frequency of a vibration forced by a component thereof, there may occur the condition known as

resonance. There are two types of resonance in electrical circuits: serial and parallel.

Serial (voltage) resonance is characterized by its circuit's low impedance for the resonant frequency. For this frequency the resultant reactance of the resonant circuit reaches zero (impedance phase angle reaches 0°). During such a resonance in the supply system may emerge voltages with significant amplitudes and the resonant frequency.

Parallel (currents) resonance is characterized by high impedance for the resonance frequency. The resonant circuit's resultant susceptance equals zero (phase angle of the admittance, and thus of the impedance, reaches 0°). In the course of such a resonance in the supply system may flow currents with considerable amplitudes and the resonance frequency.

In order to determine the resonant frequencies, the impedance $Z = f(f)$ and phase $\varphi = f(f)$ characteristics are used. If the impedance characteristic for a given frequency reaches a local impedance maximum while the impedance phase angle in the phase characteristics reaches 0° , this means that a current resonance is possible at this frequency. If the same characteristic for a given frequency reaches a local impedance minimum while the impedance phase angle reaches 0° , this means that a voltage resonance is possible at this frequency.

The structures of a power supply system and of a SVC compensator are conducive to the development of resonance phenomena. There are elements, capacitive and inductive alike (forming a circuit for natural vibration), and in the structure of a SVC there is a TCR reactor, which is a source of higher harmonics (source forced vibration).

3. The models used for testing

Used in this study were two system models, added to which was the compensator model presented in Fig. 1. The

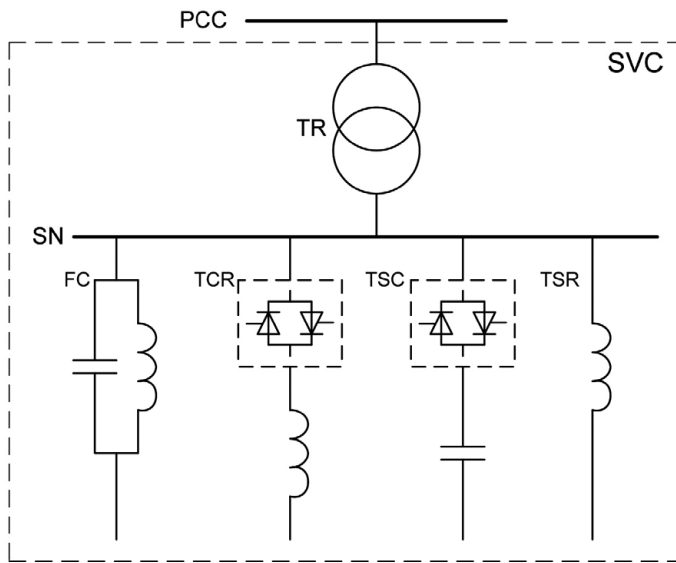


Fig. 1. Structure of the SVC compensator: TCR – thyristor controlled reactor, TSC – thyristor switched capacitor banks, TSR – thyristor switched reactor sections, FC – filters, SN – MV busbars, TR – transformer, PCC – point of connection to the system

modelled compensator had the power rating of 25 MVA (-15 MVar ÷ 25 MVar) and was connected to a 110 kV node. The considered compensator configurations are listed in Tab. 1. The basic compensator configuration is indicated in Tab. 1 as II. The first system model was simple (ideal voltage source with impedance). The use of such a simple model was connected with the study of the effects on the phenomenon of the compensator itself (TCR operation, TSC sections switched on, etc.). The second system model reflects a portion of the power grid. This model takes into account individual system components (lines, transformers, etc.) in its structure.

4. The results

The core of the analysis was to determine the impedance characteristics and the phase of the node to which the compensator was connected, and then on that basis to determine the frequency at which the conditions conducive to resonance development may occur. The study was divided into two parts.

The simple power system model was tested in the first part. The effect of a change in the compensator's configuration and settings on the node's impedance characteristics was assessed. Examples of the characteristics obtained for various configurations of the compensator are shown in Fig. 2 and 3.

It can be seen from the presented characteristics that in such a simple system both types of resonances may develop. However, the frequencies at which they may occur vary depending on the compensator's configuration, presence of filters, and the number switched on TSC sections, and the TCR element's settings. In order to trace the changes more accurately, the frequencies were read out from the impedance and phase characteristics, at which individual resonances can be excited, and the obtained results are reported in Tab. 2.

Reactor TCR [MVar]	Sections TSC [MVar]	Sections TSR [MVar]	Filters 5h and 7h (FC) [MVar]	Compensator configuration denominations
-15	2 x 50/12.5	-	-	I
-20	2 x 50/10	-	2.5 (5h) + 2.5 (7h)	II
-5	4 x 50/5	3 x -5	2.5 (5h) + 2.5 (7h)	III

Tab. 1. The compensators configurations considered in the study

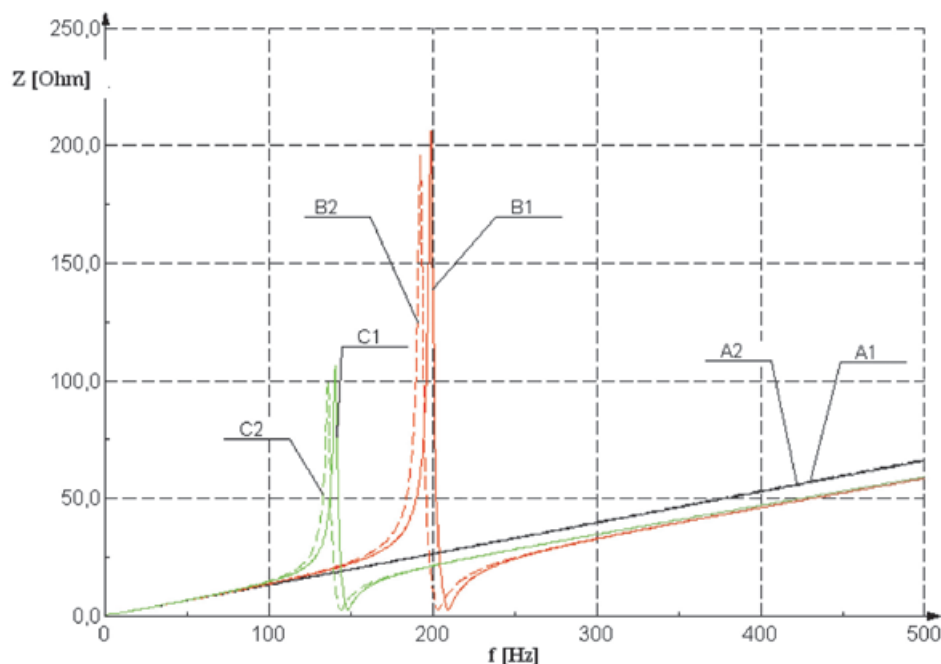


Fig. 2. Impedance characteristics of PCC node: compensator SVC configuration I; A – TSC off, B – 1 TSC section on, C – 2 TSC sections on; 1 – the highest TCR inductance ($B_{TCR} = \max$ or $B_{TCR} = -B_{TSC}$), 2 – TCR off ($B_{TCR} = 0$)

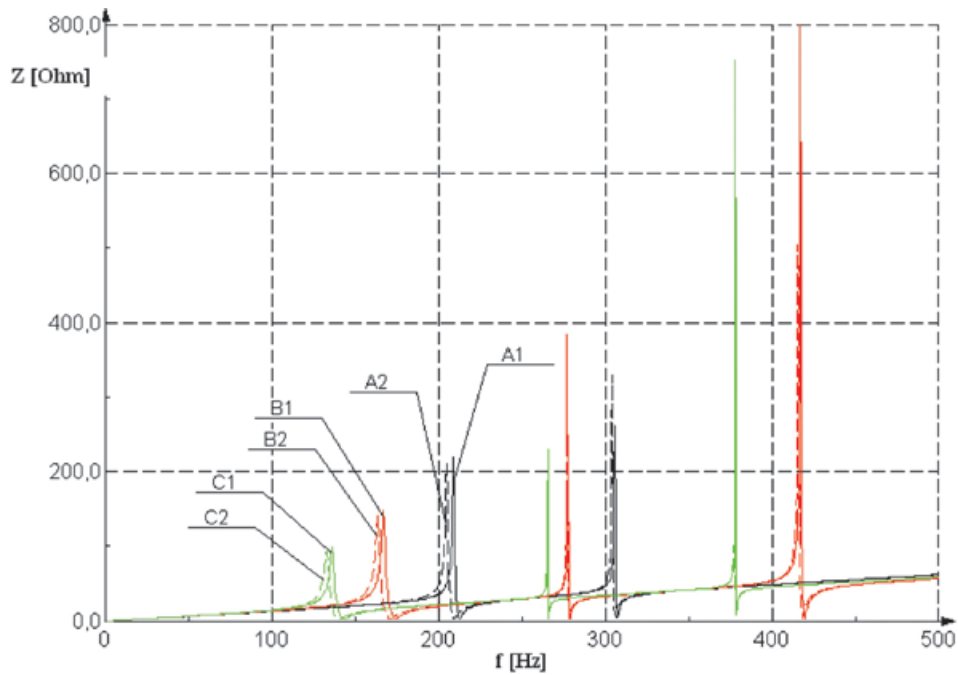


Fig. 3. Impedance characteristics of PCC node: compensator SVC configuration II; A – TSC off, B – 1 TSC section on, C – 2 TSC sections on; 1 – the highest TCR inductance ($B_{TCR} = \max$ or $B_{TCR} = -B_{TSC}$), 2 – TCR off ($B_{TCR} = 0$)

A necessary condition for the resonance development is that there is a capacitance in the circuit, and therefore the conditions conducive for resonance occurred only in the cases where at least one of the compensator's capacitive elements (FC filters, or at least one TSC section) was switched on.

Shown in Tab. 2 and Fig. 2 and 3 are data on the end points of TCR reactor's set up: for the reactor's susceptance $B_{TCR} = 0$ (reactor off) and for the condition whereby the reactor is switched on at full power ($B_{TCR} = \max$, TSC off) or offsets the susceptance of a single TSC section ($B_{TCR} = -B_{TSC}$). The study also included intermediate states of TCR set up. When TCR reactor operates and its inductance (and hence power) increases, it "moves" the resonant frequencies towards higher values. This shift in the studied system was relatively small and reached 6 Hz at maximum. This means that TCR reactor's operation with a constant capacitances connected gives rise to a certain narrow frequency range, within which a resonance can occur.

The resonance frequencies determined for each case (one for serial and one for parallel resonance) can be linked to the compensator's specific capacitance containing component.

Upon switching the first TSC section appears one pair of resonant frequencies (one frequency for serial and one parallel resonance) related to the element. If there are filters in the system, then switching the first TSC section on leads to "pushing out" the resonant frequencies associated with the filters in the direction of higher values (the maximum observed shift was in the order of 200 Hz). Switching subsequent TSC sections on leads to lowering the frequencies (the maximum noted shift was 90 Hz) related to all capacitance containing elements (of TSC and FC filters alike) in operation.

With the same compensator rated power the TCR component's lower value enforces the need for more TSC sections, but with less

power. When the compensator operates the resonant frequency conditions are changed upon switching each successive TSC section on. Thereby for the compensator the number increases of the frequency ranges, at which occur conditions favourable for the development of a voltage or current resonance.

In the second part of the study a more complex system model was tested. The tests allowed the assessment of the risks of the resonance phenomena associated with the interactions between the compensator and power system components. A sequence of 110 kV lines was selected for the tests, wherein the compensator was placed in one of three selected nodes. A simplified diagram of the grid, in which the compensator impact on resonance phenomenon was tested, is shown in Fig. 4.

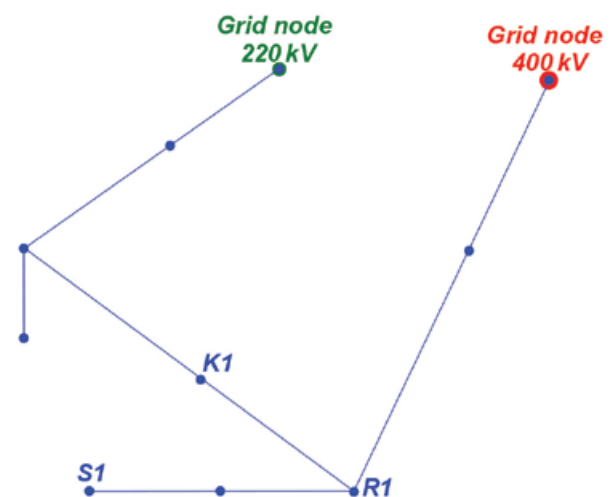


Fig. 4. Diagram of the grid in which resonance phenomena were tested

Compensator configuration designation	No of TSC sections switched on	Serial resonance [Hz]		Parallel resonance [Hz]	
		$B_{TCR} = 0$	$B_{TCR} = \max$ or $B_{TCR} = -B_{TSC}$	$B_{TCR} = 0$	$B_{TCR} = \max$ or $B_{TCR} = -B_{TSC}$
I	0	–	–	–	–
	1	203.0	209.0	192.5	199.0
	2	143.5	148.0	136.5	141.0
II	0	209.0 306.0	212.5 307.5	205.0 304.0	209.0 306.0
	1	170.5 278.5 418.5	174.0 279.0 419.5	163.5 277.0 416.0	167.0 277.5 417.0
	2	139.5 265.5 378.0	142.5 266.0 378.5	133.0 265.0 377.5	136.5 265.5 378.0
III	0	209.0 306.0	212.5 307.5	205.0 304.0	209.0 306.0
	1	190.5 290.5 507.5	192.0 291.0 509.0	184.5 289.0 500.0	186.0 289.5 502.0
	2	170.5 278.5 418.5	172.0 278.5 419.0	163.5 277.0 416.0	165.5 277.5 416.5
	3	153.5 270.5 390.5	155.0 270.5 391.0	146.5 270.0 389.5	148.5 270.0 390.0
	4	139.5 265.5 378.5	141.0 266.0 378.5	133.0 265.0 377.5	135.0 265.0 378.0

Tab. 2. List of the frequencies, at which occur conditions favourable for resonance, in various compensator configurations

In the first tests the compensator was located in point S1 – on the end of 110 kV grid radius. The impact of the compensator configuration was tested on resonance development possibility. Shown in Fig. 5 is an example of the resulting impedance characteristics, and in Tab. 3 the frequencies are listed, at which conditions are favourable for resonance.

Inclusion in this study of the power system's complex structure had not significantly altered the observations made in the first phase of the study. No "new" serial resonance frequencies were noted that might be associated with the branches formed by the power system's components. The only notable change was in the parallel resonance frequencies. This is understandable because for each of the resonances the compensator is only one of the resonant circuit's parallel branches, and the other is due to the system structure.

In subsequent tests the compensator was modelled first in node R1, and then in K1. For such location a test was performed to see how a change in the grid configuration change or a "shift" of the compensator to an adjacent node can affected the impedance characteristics. Examples of the impedance characteristics

Compensator configuration designation	No of TSC sections switched on	Serial resonance [Hz]		Parallel resonance [Hz]	
		$B_{TCR} = 0$	$B_{TSR} + B_{TCR} = \max$ or $B_{TCR} = -B_{TSC}$	$B_{TCR} = 0$	$B_{TCR} = \max$ or $B_{TCR} = -B_{TSC}$
I	0	–	–	–	–
	1	203.0	209.5	161.0	169.0
	2	143.5	148.0	113.5	119.0
II	0	209.0 306.0	212.5 307.5	189.5 299.5	196.0 301.0
	1	170.5 278.5 418.5	174.0 279.0 419.5	140.5 274 408.5	145.0 274.5 409.5
	2	140 265.5 378.5	143.0 266.0 378.5	112.0 264.0 376.0	116.0 264.0 376.0
III	0	209.0 306.0	212.5 307.5	189.5 299.5	196.0 301.0
	1	190.5 291.0 507.5	192.0 291.0 509.0	162.5 284.0 477.5	165.0 284.5 479.0
	2	170.5 278.5 418.5	172.5 278.5 419.0	140.5 274.0 408.5	143.0 274.0 409.0
	3	153.5 270.5 390.5	155.0 270.5 390.5	124.0 267.5 386.5	126.5 268.0 386.5
	4	140.0 265.5 378.5	141.5 266.0 378.5	112.0 264.0 376.0	114.0 264.0 376.0

Tab. 3. List of the frequencies, at which occur conditions favourable for resonance, in various compensator configurations – compensator in node S1

for node R1 are shown in Fig. 6, and in Tab. 4 selected frequency results for each resonances are listed.

The study showed that a change of the node, as well as a change in the grid configuration, had only changed the resonant frequencies of parallel resonances. No resonances were noted, in which did not participate the branch formed by the compensator.

5. Summary

In the case of serial resonance, the compensator is an independent branch, whereas parallel resonances develop between compensator and system components. Therefore, voltage resonance frequencies are closely related to compensator parameters, while parallel resonance frequencies depend on both compensator and system.

Changing the setting of TCR reactor's thyristor firing angles, resulting in a change of its susceptance, changes the resonance frequency in a narrow range (of the order of few Hz). The lower the reactor's inductance, the lesser extent of the impact

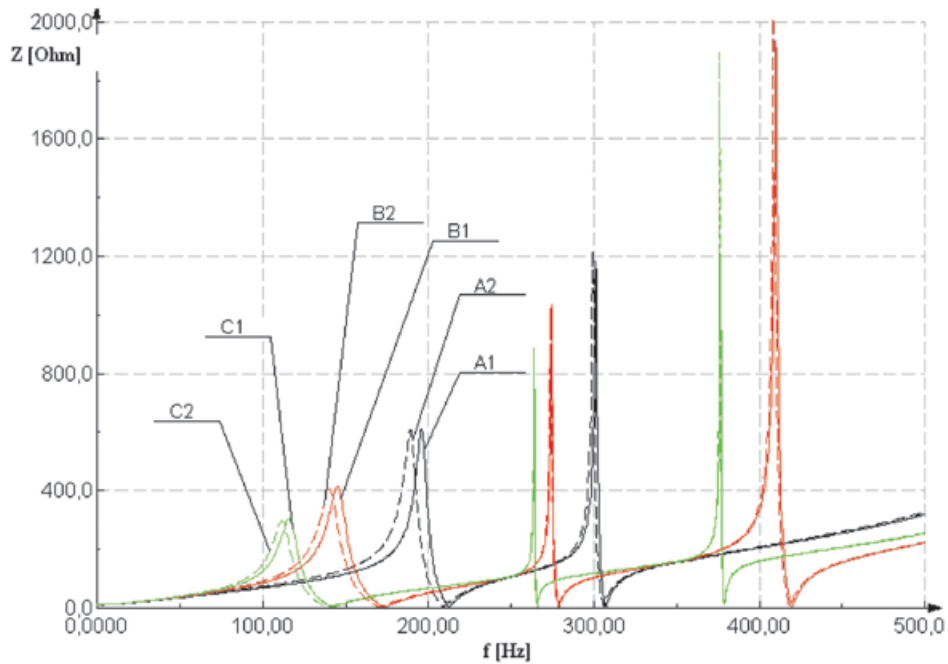


Fig. 5. Impedance characteristics of S1 node: compensator SVC configuration II; A – TSC off, B – 1 TSC section on, C – 2 TSC sections on; 1 – the highest TCR inductance ($B_{TCR} = \max$ or $B_{TCR} = -B_{TSC}$), 2 – TCR off ($B_{TCR} = 0$)

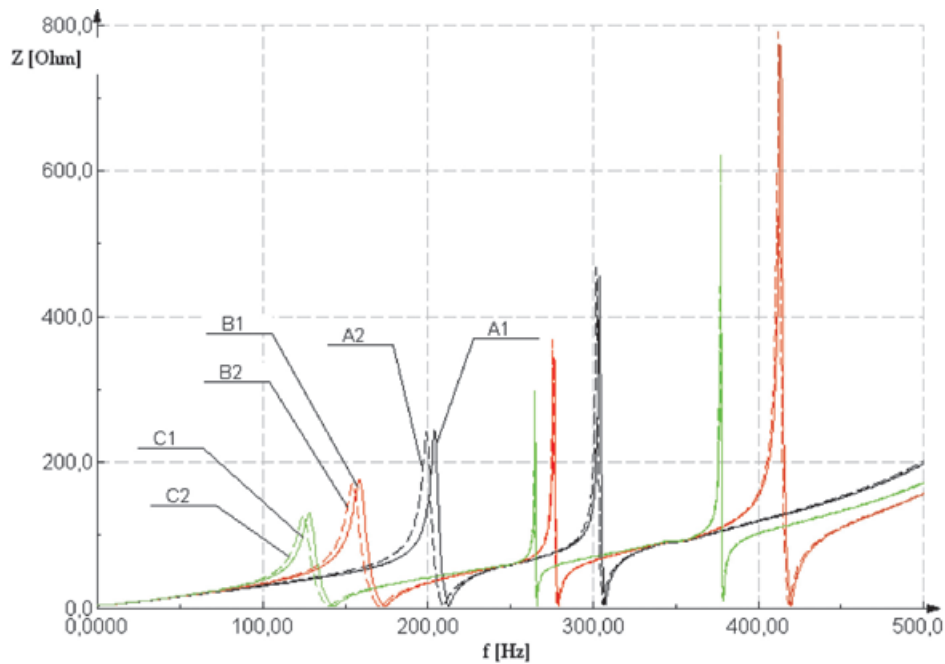


Fig. 6. Impedance characteristics of node R1, SVC compensator, configuration II; A – TSC off, B – 1 TSC section on, C – 2 TSC sections on; 1 – the highest TCR inductance ($B_{TCR} = \max$ or $B_{TCR} = -B_{TSC}$), 2 – TCR off ($B_{TCR} = 0$)

of its settings on the resonance frequency change. Whereas switching on subsequent TSC section leads to step changes in the resonant frequencies of individual resonances, but with much higher values (in the order of tens or even hundreds Hz). Therefore, with a SVC compensator in operation, the frequencies of the power supply circuit's natural vibrations associated

with changes in the compensator settings are modulated. This increases the risk that this frequency overlaps the frequency of forced vibrations introduced to the power supply circuit by the TCR element itself or by another grid component. And that means an increased risk of resonant oscillations excitation in the supply circuit.

Compensator location	No of TSC sections switched on	Serial resonance [Hz]		Parallel resonance [Hz]	
		$B_{TCR}=0$	$B_{TCR} = \max$ or $B_{TCR} = -B_{TSC}$	$B_{TCR}=0$	$B_{TCR} = \max$ or $B_{TCR} = -B_{TSC}$
R1	0	209.0 306.0	212.5 307.5	199.5 302.0	204.5 304.0
	1	170.5 278.5 418.5	174.0 279.0 419.5	155.0 275.5 412.0	159.0 276.5 413.5
	2	140.0 266.0 378.5	143.0 266.0 378.5	125.0 264.5 377.0	128.5 265.0 377.0
R1 (line between R1 and K1 off)	0	209.0 306.0	212.5 307.5	195.5 301.0	201.0 302.5
	1	170.5 278.5 418.5	174.0 279.0 419.5	149.0 275.0 410.5	153.0 275.5 411.5
	2	140.0 265.5 378.5	143.0 266.0 378.5	119.5 264.5 376.5	123.0 264.5 376.5
K1	0	209.0 306.0	212.5 307.5	198.5 302.0	203.5 303.5
	1	170.5 278.5 418.5	174.0 279.0 419.5	153.5 275.5 412.0	157.5 276.0 413.0
	2	140.0 265.5 378.5	143.5 266.0 378.5	123.5 264.5 377.0	127.5 265.0 377.0

Tab. 4. List of the frequencies, at which occur conditions favourable for resonance, in various compensator locations – compensator in nodes R1 and K1, compensator configuration II

REFERENCES

- Z. Fan, E. Johan, Harmonic Impedance Analysis in the Presence of Static Var Compensator (SVC), Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES.
- R. Kenarangui, Decision Based VAR Compensators Placement in Electric Power Systems, IEEE 1991.
- R. Kowalak, R. Zajczyk, Wpływ kompensatora SVC na warunki rezonansowe w układzie zasilania [Impact of SVC compensator on resonance conditions in power system], III Scientific – Technical Conference “Problems of Reactive Power in Distribution and Transmission Grids”, Wisła, 10–11 December 2014.
- R. Kowalak, R. Zajczyk, Lokalizacja źródeł mocy biernej w systemie elektroenergetycznym z wykorzystaniem metody zbiorów rozmytych [Allocation of reactive power sources in power system using the fuzzy sets method], *Wiadomości Elektrotechniczne*, No. 01/2013.
- R. Kowalak, R. Zajczyk, Zastosowanie zbiorów rozmytych do lokalizacji dodatkowych źródeł mocy biernej w systemie elektroenergetycznym [The use of fuzzy sets to allocate additional reactive power sources in power system], II Scientific – Technical Conference “Problems of Reactive Power in Distribution and Transmission Grids”, Wisła, 24–25 October 2012
- W-M. Lin et al., *Optimal Location and Capacity of STATCOM for Voltage stability Enhancement using ACO plus GA*, 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Suntec Convention and Exhibition Center, Singapore, 14–17 July 2009.
- M.A.S. Masoum et al., Fuzzy Approach for Optimal Placement and Sizing of Capacitor Banks in the Presence of Harmonics, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 2, April 2004.
- S. F. Mekhamer et al., State of the Art in Optimal Capacitor Allocation for Reactive Power Compensation in Distribution Feeders, Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, IEEE 2002.
- I. Pisica et al., Optimal SVC Placement in Electric Power Systems Using a Genetic Algorithms Based Method, IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th – July 2nd, Bucharest, Romania, 2009.
- R. Kowalak, R. Zajczyk, Wykorzystanie logiki zbiorów rozmytych w określaniu lokalizacji dodatkowych źródeł mocy biernej w systemie elektroenergetycznym [The use of fuzzy sets logic in allocation of additional reactive power sources in power system], *Elektroenergetyka współczesność i rozwój*, No. 3–4 (13–14)/2012.

Robert Kowalak

Gdańsk University of Technology

e-mail: robert.kowalak@pg.gda.pl

Graduated from the Faculty of Electrical and Control Engineering at Gdańsk University of Technology in 2000. He received his PhD in engineering at the same faculty in 2005. Presently, he has been working as a lecturer in the Power Engineering Department of the Faculty of Electrical and Control Engineering at Gdańsk University of Technology. His professional interests include: high-voltage power electronics systems (FACTS, HVDC), modelling the operation of power electronics systems in a power system, cooperation of power supply systems with traction power systems, and issues related to the allocation of reactive power compensator in power system.

Author or co-author of over 30 publications.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 70–75. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Warunki rezonansowe w węźle z kompensatorem SVC

Autor

Robert Kowalak

Słowa kluczowe

SVC, rezonans, moc bierna

Streszczenie

Celem instalowania kompensatorów statycznych bocznikowych w sieciach elektroenergetycznych wysokich napięć jest przede wszystkim poprawa warunków napięciowych. Dodatkowe źródła mocy biernej zwiększają stabilność napięciową systemu, a także pozwalają na szybszą odbudowę systemu w przypadku awarii o charakterze napięciowym. W artykule zaprezentowano wpływ struktury i wysterowania układu SVC na zmianę impedancji w układzie zasilania, a więc tym samym na częstotliwości, przy których może dojść do wzbudzenia zjawisk rezonansowych.

1. Wstęp

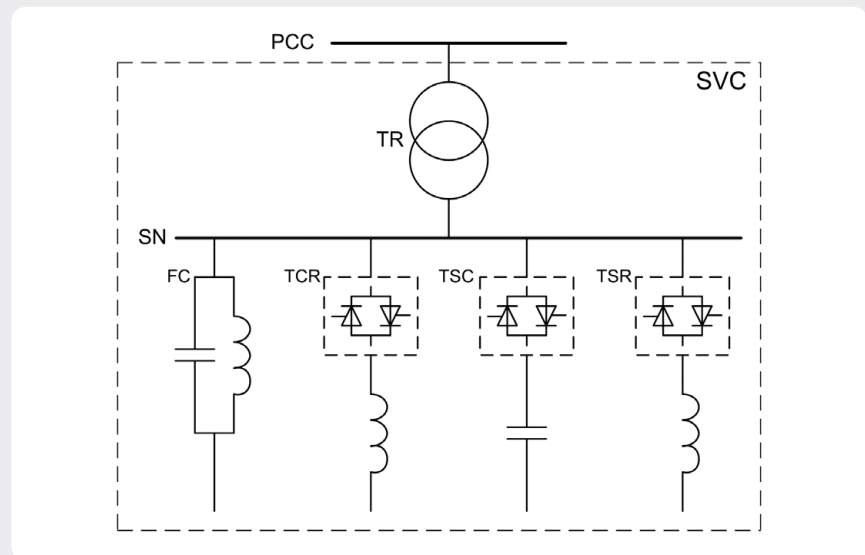
Elementy systemu elektroenergetycznego charakteryzują się znaczną indukcyjnością, która decyduje o charakterze całego systemu zasilania. Wprowadzenie do takiego układu kompensatora zawierającego elementy pojemnościowe może przyczynić się do wzbudzenia w układzie zasilania drgań o charakterze rezonansowym [1, 3].

Kompensatorami najbardziej rozpowszechnionymi w systemach elektroenergetycznych są baterie kondensatorów i/lub dławików załączanych łącznikami elektromechanicznymi. Nowocześniejszymi od nich i stopniowo zyskującymi coraz większe znaczenie są kompensatory energoelektroniczne: SVC oraz STATCOM. Kompensatory te, ze względu na szybkość prowadzonego procesu regulacji, mają również wpływ na zwiększenie stabilności systemu w czasie stanów awaryjnych.

Artykuł nawiązuje do badań dotyczących metod wyboru i oceny lokalizacji w systemie nowych kompensatorów [3, 4, 5, 10]. Wybór lokalizacji kompensatora i jej ocena, szczególnie w odniesieniu do sieci zamkniętej, jest sprawą złożoną [2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Musi uwzględniać wiele czynników związanych z pracą systemu oraz cechami wprowadzanego źródła mocy biernej, w tym zagrożenia wystąpieniem rezonansów. W układzie z kompensatorem energoelektronicznym są one zależne od jego struktury, wysterowania, miejsca zainstalowania czy konfiguracji sieci. Prezentowane wyniki badań otrzymano przy wykorzystaniu oprogramowania DiGSILENT PowerFactory®.

2. Zjawisko rezonansu

Każdy obwód elektryczny zawierający w swojej strukturze elementy pojemnościowe i indukcyjne charakteryzują częstotliwości drgań tzw. własnych (swobodnych). W układach elektrycznych występują też różnorodne elementy, które wprowadzają do obwodu prądu i/lub napięcia o charakterystycznej dla siebie częstotliwości – są to źródła drgań wymuszonych. W przypadku obwodu, którego częstotliwość drgań własnych będzie taka sama jak częstotliwość drgań wymuszonych przez jakiś jego element, może zaistnieć w nim stan określany mianem rezonansu. W obwodach elektrycznych wyróżniamy dwa typy rezonansu: szeregowy i równoległy.



Rys. 1. Struktura kompensatora SVC uwzględniona w badaniach:

TCR – tyrystorowo regulowany dławik, TSC – tyrystorowo załączane baterie kondensatorów, TSR – tyrystorowo załączane sekcje dławików, FC – filtry, SN – szyny średniego napięcia, TR – transformator, PCC – punkt przyłączenia do systemu

Dławik TCR [MVar]	Sekcje TSC [MVar]	Sekcje TSR [MVar]	Filtry 5h i 7h (FC) [MVar]	Przyjęte oznaczenie konfiguracji kompensatora
-15	2 x 12,5	-	-	I
-20	2 x 10	-	2,5 (5h) + 2,5 (7h)	II
-5	4 x 5	3 x -5	2,5 (5h) + 2,5 (7h)	III

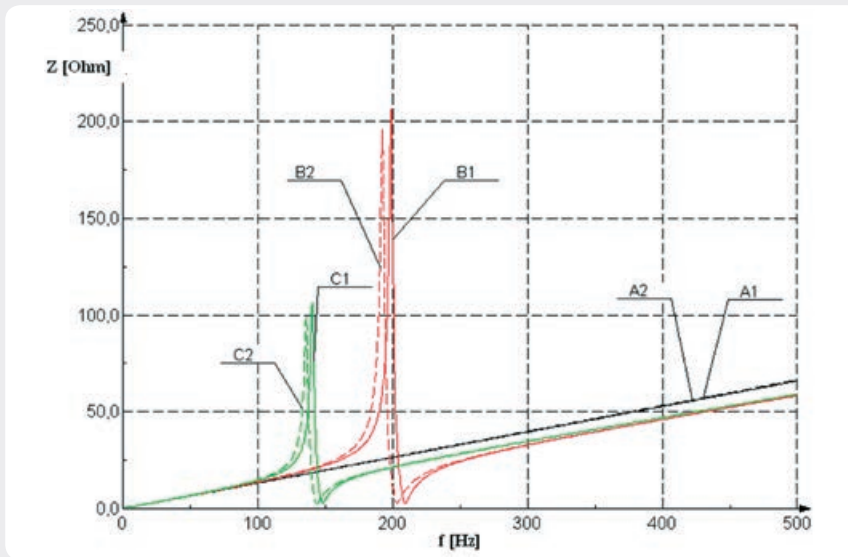
Tab. 1. Konfiguracje kompensatorów uwzględnione w badaniach

Rezonans szeregowy (napięcie) cechuje mała wartość impedancji obwodu dla częstotliwości rezonansowej. Wypadkowa reaktancja obwodu rezonansowego osiąga dla tej częstotliwości wartość zerową (kąąt fazowy impedancji osiąga wartość 0°). W trakcie takiego rezonansu może dojść do pojawienia się w układzie zasilania napięć o znaczących amplitudach i częstotliwości rezonansowej. Rezonans równoległy (prądów) cechuje natomiast duża wartość impedancji dla

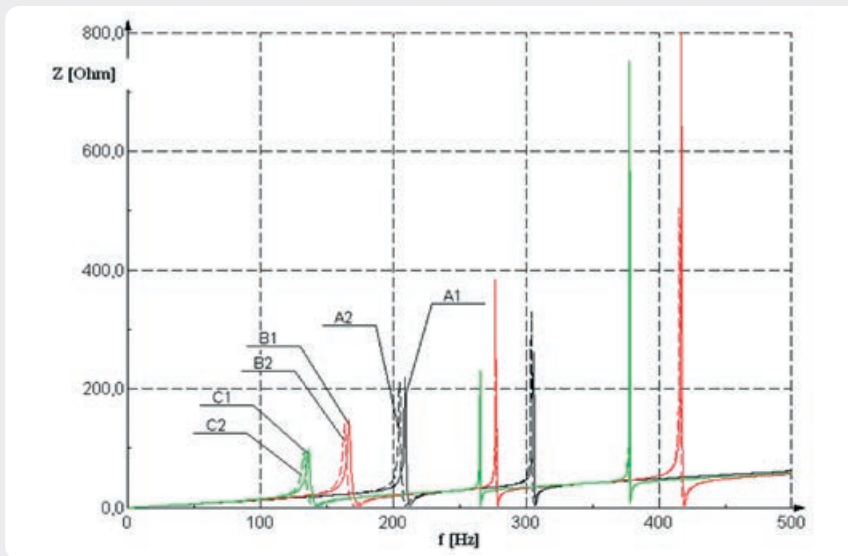
częstotliwości rezonansowej. Wypadkowa susceptancja obwodu rezonansowego przyjmuje wartość zerową (kąąt fazowy admittancji, a tym samym i impedancji, osiąga wartość 0°). W trakcie takiego rezonansu mogą w układzie zasilania płynąć prądy o znacznych wartościach amplitudy i o częstotliwości rezonansowej. W celu określania częstotliwości rezonansowych wykorzystywane są charakterystyki impedancyjne $Z = f(f)$ oraz fazowe $\varphi = f(f)$.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 70–75. When referring to the article please refer to the original text.

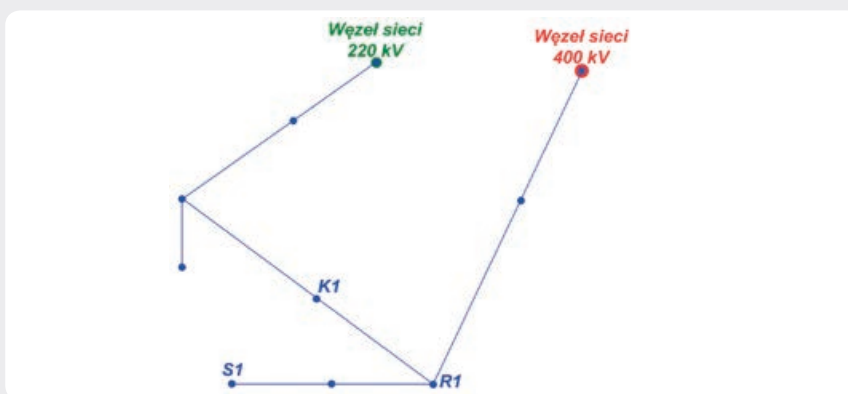
PL



Rys. 2. Charakterystyki impedancyjne węzła PCC: kompensator SVC konfiguracja I, A – TSC wyłączony, B – załączona 1 sekcja TSC, C – załączone 2 sekcje TSC, 1 – największa wartość indukcyjności TCR ($B_{TCR} = \max$ lub $B_{TCR} = -B_{TSC}$), 2 – TCR wyłączony ($B_{TCR} = 0$)



Rys. 3. Charakterystyki impedancyjne węzła PCC: kompensator SVC konfiguracja II, A – TSC wyłączony, B – załączona 1 sekcja TSC, C – załączone 2 sekcje TSC, 1 – największa wartość indukcyjności TCR ($B_{TCR} = \max$ lub $B_{TCR} = -B_{TSC}$), 2 – TCR wyłączony ($B_{TCR} = 0$)



Rys. 4. Schemat sieci, w której analizowano zjawiska rezonansowe

Jeżeli na charakterystyce impedancyjnej dla danej wartości częstotliwości obserwujemy lokalne maksimum impedancji i równocześnie kąt fazowy impedancji widoczny na charakterystyce fazowej osiąga wartość 0° , to oznacza, że możliwy jest przy tej częstotliwości rezonans prądów. Jeżeli na tej samej charakterystyce dla danej wartości częstotliwości obserwujemy lokalne minimum impedancji i równocześnie kąt fazowy impedancji osiąga wartość 0° , to oznacza, że możliwy jest przy tej częstotliwości rezonans napięć.

Struktura systemu zasilania, jak i kompensatora SVC, sprzyjają powstawaniu zjawisk rezonansowych. Występują tu zarówno elementy pojemnościowe, jak i indukcyjne (tworzące obwód dla drgań własnych), a w strukturze SVC znajduje się dławik TCR, który jest źródłem wyższych harmonicznymi (źródło drgań wymuszonych).

3. Modele wykorzystane do badań

W badaniach wykorzystano dwa modele systemu, do których wprowadzono model kompensatora zaprezentowany na rys. 1. Modelowany kompensator miał moc znamionową 25 MVA ($-15 \text{ MVar} \div 25 \text{ MVar}$) i był przyłączony do węzła 110 kV. Uwzględnione konfiguracje kompensatorów zestawiono w tab. 1. Jako podstawową konfigurację kompensatora przyjęto tę, którą w tab. 1 oznaczono symbolem II.

Pierwszy z wykorzystanych modeli systemu był prosty (idealne źródło napięcia z impedancją). Wykorzystanie tak prostego modelu związane było z badaniami wpływu na zjawiska rezonansowe samego kompensatora (praca TCR, załączone sekcje TSC itp.). Drugi z modeli systemu odzwierciedla fragment sieci elektroenergetycznej. Model ten uwzględnia w swojej strukturze poszczególne elementy składowe systemu (linie, transformatory itp.).

4. Wyniki badań

Podstawą przeprowadzonej analizy było wyznaczenie charakterystyk impedancyjnych i fazowych węzła, do którego włączony został kompensator, a następnie na ich podstawie określenie częstotliwości, przy których mogą zaistnieć warunki sprzyjające powstaniu rezonansu. Przeprowadzone badania zostały podzielone na dwie części.

W pierwszej części wykonano badania z wykorzystaniem prostego modelu systemu elektroenergetycznego. Oceniono wpływ zmiany konfiguracji iysterowania samego kompensatora na charakterystyki impedancyjne węzła. Przykładowe charakterystyki uzyskane dla różnych konfiguracji kompensatora zaprezentowano na rys. 2 i 3.

Na podstawie zaprezentowanych charakterystyk można zauważyć, że w tak prostym układzie istnieje możliwość powstania obu typów rezonansów. Jednakże wartości częstotliwości, przy których mogą one wystąpić, ulegają pewnym zmianom zależnym od konfiguracji kompensatora, obecności filtrów i liczby załączonych sekcji TSC, a także odysterowania elementu TCR. W celu dokładniejszego prześledzenia zachodzących zmian z charakterystyk impedancyjnych i fazowych odczytano częstotliwości, przy których mogą się wzbudzić

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 70-75. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Oznaczenie konfiguracji kompensatora	Liczba załączonych sekcji TSC	Rezonans szeregowy [Hz]		Rezonans równoległy [Hz]	
		$B_{TCR} = 0$	$B_{TCR} = \max$ lub $B_{TCR} = -B_{TSC}$	$B_{TCR} = 0$	$B_{TCR} = \max$ lub $B_{TCR} = -B_{TSC}$
I	0	-	-	-	-
	1	203,0	209,0	192,5	199,0
	2	143,5	148,0	136,5	141,0
II	0	209,0	212,5	205,0	209,0
		306,0	307,5	304,0	306,0
		170,5	174,0	163,5	167,0
	1	278,5	279,0	277,0	277,5
		418,5	419,5	416,0	417,0
		139,5	142,5	133,0	136,5
2	265,5	266,0	265,0	265,5	
	378,0	378,5	377,5	378,0	
	139,5	141,0	133,0	135,0	
III	0	209,0	212,5	205,0	209,0
		306,0	307,5	304,0	306,0
		190,5	192,0	184,5	186,0
	1	290,5	291,0	289,0	289,5
		507,5	509,0	500,0	502,0
		170,5	172,0	163,5	165,5
	2	278,5	278,5	277,0	277,5
		418,5	419,0	416,0	416,5
		153,5	155,0	146,5	148,5
	3	270,5	270,5	270,0	270,0
		390,5	391,0	389,5	390,0
		139,5	141,0	133,0	135,0
4	265,5	266,0	265,0	265,0	
	378,5	378,5	377,5	378,0	

Tab. 2. Zestawienie częstotliwości, przy których występują warunki sprzyjające rezonansom, przy zastosowaniu różnych konfiguracji kompensatora

Oznaczenie konfiguracji kompensatora	Liczba załączonych sekcji TSC	Rezonans szeregowy [Hz]		Rezonans równoległy [Hz]	
		$B_{TCR} = 0$	$B_{TSR} + B_{TCR} = \max$ lub $B_{TCR} = -B_{TSC}$	$B_{TCR} = 0$	$B_{TCR} = \max$ lub $B_{TCR} = -B_{TSC}$
I	0	-	-	-	-
	1	203,0	209,5	161,0	169,0
	2	143,5	148,0	113,5	119,0
II	0	209,0	212,5	189,5	196,0
		306,0	307,5	299,5	301,0
		170,5	174,0	140,5	145,0
	1	278,5	279,0	274	274,5
		418,5	419,5	408,5	409,5
		140	143,0	112,0	116,0
2	265,5	266,0	264,0	264,0	
	378,5	378,5	376,0	376,0	
	140	141,5	112,0	114,0	
III	0	209,0	212,5	189,5	196,0
		306,0	307,5	299,5	301,0
		190,5	192,0	162,5	165,0
	1	291,0	291,0	284,0	284,5
		507,5	509,0	477,5	479,0
		170,5	172,5	140,5	143,0
	2	278,5	278,5	274,0	274,0
		418,5	419,0	408,5	409,0
		153,5	155,0	124,0	126,5
	3	270,5	270,5	267,5	268,0
		390,5	390,5	386,5	386,5
		140,0	141,5	112,0	114,0
4	265,5	266,0	264,0	264,0	
	378,5	378,5	376,0	376,0	

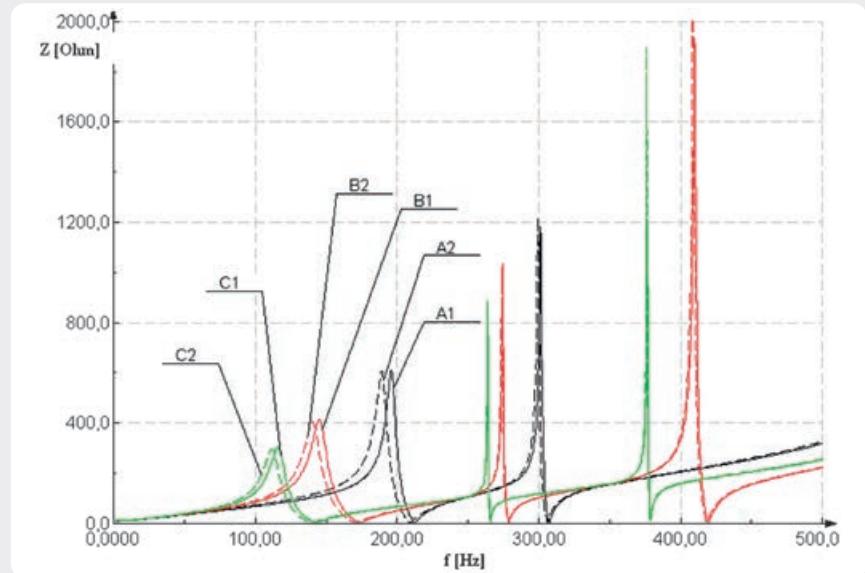
Tab. 3. Zestawienie częstotliwości, przy których występują warunki sprzyjające rezonansom, przy zastosowaniu różnych konfiguracji kompensatora – kompensator w węźle S1

poszczególne rezonanse, a uzyskane wyniki zestawiono w tab. 2.

Warunkiem koniecznym do powstania rezonansu jest istnienie w obwodzie pojemności, dlatego warunki sprzyjające rezonansom występowały tylko wówczas, gdy załączony był co najmniej jeden z pojemnościowych elementów kompensatora (filtry FC lub co najmniej jedna sekcja TSC).

W tab. 2, jak i na rys. 2 i 3, zaprezentowano dane dotyczące skrajnych punktów wysterowania dławika TCR: dla susceptancji dławika $B_{TCR} = 0$ (dławik wyłączony) oraz dla sytuacji, gdy dławik załączony jest na pełną moc ($B_{TCR} = \max$, TSC wyłączony) lub równoważy susceptancję pojedynczej sekcji TSC ($B_{TCR} = -B_{TSC}$). W badaniach uwzględniono także stany pośrednie wysterowania TCR. Pracujący dławik TCR w miarę wzrostu swojej indukcyjności (a tym samym mocy) „przesuwa” częstotliwości rezonansowe w kierunku wyższych wartości. Zaobserwowana w przypadku analizowanego układu zmiana była stosunkowo niewielka, osiągająca maksymalnie 6 Hz. Oznacza to, że pracujący dławik TCR, przy stałej wartości załączonych pojemności, przyczynia się do powstania pewnego wąskiego zakresu częstotliwości, w której może dojść do rezonansu.

Dla każdego przypadku określone częstotliwości rezonansowe (jedna dla rezonansu szeregowego i jedna dla równoległego) dają się powiązać z konkretnym elementem



Rys. 5. Charakterystyki impedancyjne węzła S1, kompensator SVC konfiguracja II, A – TSC wyłączony, B – załączona 1 sekcja TSC, C – załączone 2 sekcje TSC, 1 – największa wartość indukcyjności TCR ($B_{TCR} = \max$ lub $B_{TCR} = -B_{TSC}$), 2 – TCR wyłączony ($B_{TCR} = 0$)

składowym kompensatora zawierającym pojemność. W chwili załączenia pierwszej sekcji TSC pojawia się jedna para częstotliwości

rezonansowych (jedna częstotliwość dla rezonansu szeregowego i jedna dla równoległego) związana z tym elementem. Jeżeli w układzie pracują filtry,

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 70–75. When referring to the article please refer to the original text.

PL

to załączenie pierwszej sekcji TSC prowadzi do „wypchnięcia” częstotliwości rezonansowych związanych z filtrami w kierunku wyższych wartości (maksymalna zaobserwowana zmiana była rzędu 200 Hz). Załączanie kolejnych sekcji TSC prowadzi natomiast do obniżania wartości częstotliwości (maksymalna zaobserwowana zmiana miała wartość 90 Hz) związanych z wszystkimi pracującymi elementami zawierającymi pojemność (zarówno samego TSC, jak i filtrów FC).

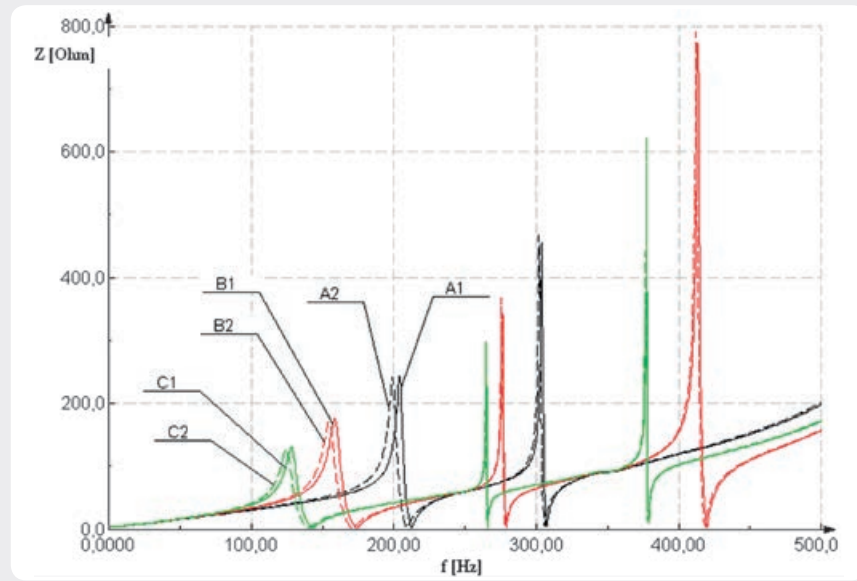
Mniejsza wartość elementu TCR, przy tej samej mocy znamionowej kompensatora, wymusza konieczność stosowania większej liczby sekcji TSC, ale o mniejszych mocach. W czasie pracy kompensatora warunki częstotliwości rezonansowych ulegają zmianie przy załączeniu każdej kolejnej sekcji TSC. Tym samym dla kompensatora wzrasta liczba przedziałów częstotliwości, przy których występują warunki korzystne dla wystąpienia rezonansu napięć lub prądów.

Druga część badań modelowych została przeprowadzona według bardziej złożonego modelu systemu. Badania pozwoliły na ocenę zagrożeń zjawiskami rezonansowymi związanymi ze wzajemnymi oddziaływaniami na siebie kompensatora i elementów systemu elektroenergetycznego. Do analizy wybrano ciąg liniowy 110 kV, w którym kompensator umieszczono w jednym z trzech wybranych węzłów. Uproszczony schemat sieci, w której analizowano wpływ kompensatora na zjawiska rezonansowe, zaprezentowano na rys. 4.

W pierwszej kolejności badania wykonano dla lokalizacji kompensatora w punkcie S1 – kompensator był umieszczony na końcu promienia sieci 110 kV. Badano wpływ konfiguracji kompensatora na możliwość powstania rezonansu. Na rys. 5 zaprezentowano przykładową uzyskaną charakterystykę impedancyjną, a w tab. 3 zestawiono częstotliwości, przy których występują warunki sprzyjające rezonansom.

Uwzględnienie w prowadzonych badaniach złożonej struktury systemu elektroenergetycznego nie wprowadziło znaczących zmian w obserwacjach poczynionych w pierwszej fazie badań. Nie zaobserwowano „nowych” częstotliwości dla rezonansów szeregowych, które mogłyby być związane z gałęziami tworzonymi przez elementy systemu elektroenergetycznego. Jedyną zaobserwowaną zmianą dotyczyła wartości częstotliwości dla rezonansów równoległych. Jest to zrozumiałe, ponieważ dla każdego z tych rezonansów kompensator stanowi tylko jedną z równoległych gałęzi obwodu rezonansowego, a druga wynika ze struktury systemu. W następnych badaniach zamodelowano kompensator najpierw w węzle R1, a następnie K1. Dla takich lokalizacji wykonano badanie pozwalające zaobserwować, jak na kształtowanie się charakterystyk impedancyjnych może wpływać zmiana konfiguracji sieci lub „przesunięcie” kompensatora do sąsiedniego węzła. Przykładowe charakterystyki impedancyjne dla węzła R1 zaprezentowano na rys. 6, a w tab. 4 zestawiono wybrane wyniki wartości częstotliwości dla poszczególnych rezonansów.

Przeprowadzone badania wykazały, że zmiana węzła, jak i zmiana konfiguracji



Rys. 6. Charakterystyki impedancyjne węzła R1, kompensator SVC konfiguracja II: A – TSC wyłączony, B – załączona 1 sekcja TSC, C – załączone 2 sekcje TSC, 1 – największa wartość indukcyjności TCR ($B_{TCR} = \max$ lub $B_{TCR} = -B_{TSC}$), 2 – TCR wyłączony ($B_{TCR} = 0$)

Lokalizacja kompensatora	Liczba załączonych sekcji TSC	Rezonans szeregowy [Hz]		Rezonans równoległy [Hz]	
		$B_{TCR} = 0$	$B_{TCR} = \max$ lub $B_{TCR} = -B_{TSC}$	$B_{TCR} = 0$	$B_{TCR} = \max$ lub $B_{TCR} = -B_{TSC}$
R1	0	209,0 306,0	212,5 307,5	199,5 302,0	204,5 304,0
	1	170,5 278,5 418,5	174,0 279,0 419,5	155,0 275,5 412,0	159,0 276,5 413,5
	2	140,0 266,0 378,5	143,0 266,0 378,5	125,0 264,5 377,0	128,5 265,0 377,0
R1 (wyłączenie linii pomiędzy węzłami R1 i K1)	0	209,0 306,0	212,5 307,5	195,5 301,0	201,0 302,5
	1	170,5 278,5 418,5	174,0 279,0 419,5	149,0 275,0 410,5	153,0 275,5 411,5
	2	140,0 265,5 378,5	143,0 266,0 378,5	119,5 264,5 376,5	123,0 264,5 376,5
K1	0	209,0 306,0	212,5 307,5	198,5 302,0	203,5 303,5
	1	170,5 278,5 418,5	174,0 279,0 419,5	153,5 275,5 412,0	157,5 276,0 413,0
	2	140,0 265,5 378,5	143,5 266,0 378,5	123,5 264,5 377,0	127,5 265,0 377,0

Tab. 4. Zestawienie częstotliwości, przy których występują warunki sprzyjające rezonansom, przy zastosowaniu różnych lokalizacji kompensatora – kompensator w węzle R1 i K1, konfiguracja kompensatora II

sieci, wprowadziły jedynie zmianę wartości częstotliwości rezonansowych dla rezonansów równoległych. Nie zaobserwowano rezonansów, w których nie uczestniczyłaby gałąź tworzona przez kompensator.

5. Podsumowanie

W przypadku rezonansów szeregowych kompensator stanowi niezależną gałąź, natomiast rezonanse równoległe zachodzą pomiędzy kompensatorem i elementami

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 70–75. When referring to the article please refer to the original text.

PL

systemu. Dlatego też wartości częstotliwości rezonansowych dla rezonansów napięciowych są ściśle związane z parametrami kompensatora, natomiast na wartości częstotliwości rezonansowych rezonansów równoległych ma wpływ zarówno kompensator, jak i system.

Zmiana kąta wysterowania tyrystorów dławika TCR, skutkująca zmianą jego susceptancji, zmienia wartość częstotliwości rezonansowej w wąskim zakresie (rzędu pojedynczych herców). Im mniejsza wartość indukcyjności zastosowanego dławika, tym w mniejszym zakresie na zmianę częstotliwości rezonansowej wpływa jego wysterowanie. Natomiast załączanie kolejnych sekcji TSC doprowadza do skokowych zmian częstotliwości rezonansowych dla poszczególnych rezonansów, ale o znacznie większe wartości (rzędu dziesiątek, a nawet pojedynczych setek herców).

Przy pracującym kompensatorze SVC dochodzi więc do modyfikacji częstotliwości drgań własnych obwodu zasilania związanych ze zmianami w wysterowaniu kompensatora. Dzięki temu wzrasta zagrożenie, że częstotliwość ta nałoży się na częstotliwość drgań wymuszonych wprowadzanych do układu zasilania przez sam element TCR lub inny obiekt w sieci. A to oznacza zwiększone zagrożenie wzbudzenia oscylacji rezonansowych w układzie zasilania.

Bibliografia

1. Fan Z., Johan E., Harmonic Impedance Analysis in the Presence of Static Var Compensator (SVC), Power Systems Conference and Exposition, PSCE '06, 2006 IEEE PES.
2. Kenarangi R., Decision Based VAR Compensators Placement in Electric Power Systems, IEEE 1991.
3. Kowalak R., Zajczyk R., Wpływ kompensatora SVC na warunki rezonansowe w układzie zasilania, III Konferencja Naukowo-Techniczna „Problematyka mocy biernej w sieciach dystrybucyjnych i przesyłowych”, Wisła, 10–11 grudnia 2014.
4. Kowalak R., Zajczyk R., Zbroński A., Lokalizacja źródeł mocy biernej w systemie elektroenergetycznym z wykorzystaniem metody zbiorów rozmytych, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2013, nr 1.
5. Kowalak R., Zajczyk R., Zbroński A., Zastosowanie zbiorów rozmytych do lokalizacji dodatkowych źródeł mocy biernej w systemie elektroenergetycznym, II Konferencja Naukowo-Techniczna „Problematyka mocy biernej w sieciach dystrybucyjnych i przesyłowych”, Wisła, 24–25 października 2012.
6. Lin W.-M. i in., Optimal Location and Capacity of STATCOM for Voltage stability Enhancement using ACO plus GA, 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Suntec Convention and Exhibition Center, Singapore, 14–17 lipca 2009.
7. Masoum M.A.S. i in., Fuzzy Approach for Optimal Placement and Sizing of Capacitor Banks in the Presence of Harmonics, *IEEE Transactions on Power Delivery* 2004, Vol. 19, No. 2.
8. Mekhamer S.F. i in., State of the Art in Optimal Capacitor Allocation for Reactive Power Compensation in Distribution Feeders, Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, IEEE 2002.
9. Pisica I. i in., Optimal SVC Placement in Electric Power Systems Using a Genetic Algorithms Based Method, IEEE Bucharest Power Tech Conference, Bucharest, Romania, 28 czerwca – 1 lipca 2009.
10. Zajczyk R., Kowalak R., Zbroński A., Wykorzystanie logiki zbiorów rozmytych w określaniu lokalizacji dodatkowych źródeł mocy biernej w systemie elektroenergetycznym, *Elektroenergetyka Współczesność i Rozwój* 2012, nr 3–4 (13–14).

Robert Kowalak

dr inż.

Politechnika Gdańska

e-mail: robert.kowalak@pg.gda.pl

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (2000). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał na swoim macierzystym wydziale (2005). Pracuje w Katedrze Elektroenergetyki Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG na stanowisku adiunkta. Jego zawodowe zainteresowania obejmują: układy energoelektroniczne dużych mocy (FACTS, HVDC), modelowanie pracy układów energoelektronicznych w systemie elektroenergetycznym, współpracę układów zasilania z elektroenergetyką trakcyjną oraz zagadnienia związane z lokalizacją kompensatorów mocy biernej w systemie elektroenergetycznym. Jest autorem lub współautorem ponad 30 publikacji.