Simulace a experimentální měření složeného napětí na odporové zátěži

Karel Veisheipl
Katedra elektroenergetiky a ekologie
Fakulta elektrotechnická
Západočeská univerzita v Plzni
veisk@kee.zcu.cz

Simulation and Experimental Measurement of the Composite Voltage at the Resistive Load

Abstract – **The problematic of the combined and composite voltages is more discussed during the last few years because of the possibility of creating power lines with both AC and DC line. This paper deals with the measurement and simulation of composite voltage at the resistive load and their comparison.**

Keywords – Voltage measurement; Combined voltage; Composite voltage; Simulation.

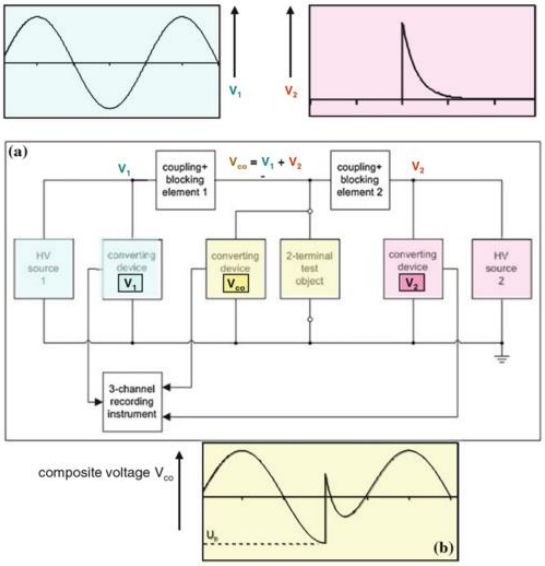
I. ÚVOD

V minulosti nebylo problematice složených a kombinovaných napětí věnováno příliš pozornosti, až na některé specifické případy. V posledních letech se ovšem stále častěji vyskytují články, které se této problematice věnují v souvislosti s modernizací přenosových soustav. Dnes je totiž takřka nemožné vystavět nové koridory pro jejich posílení a jako jedno z možných řešení se tedy jeví využití stávající infrastruktury a vedle střídavých linek vést linky stejnosměrné. Takovéto konverze jsou pak na základě různých studií proveditelné. Na základě této možnosti se pak začaly objevovat články věnující se problematice skládání a kombinování jednotlivých napětí stejně jako sledování částečných výbojů pod takovýmto zatížením a podobně. Skládání a kombinování napětí má pak svá specifika a omezení. Je například nutné brát v potaz ochranu dílčích napěťových zdrojů. O složeném napětí hovoříme v případě, kdy jsou napětí z jednotlivých zdrojů svedena do jednoho bodu. Testovaný objekt je pak připojen mezi tento bod a zem. Výsledné složené napětí je pak dáno součtem jednotlivých dílčích. V případě kombinovaného napětí jsou napěťové zdroje připojeny ke zkoušenému objektu paralelně a výsledné napětí je dáno rozdílem dílčích napětí.

Na obrázku 1 je principiální schéma pro měření složeného napětí podle [5]. Podstatnou částí jsou pak propouštěcí/ochranné prvky, které mají za úkol vždy propustit napětí jednoho zdroje a ochránit ho proti napětí a proudu ze zdroje protějšího.

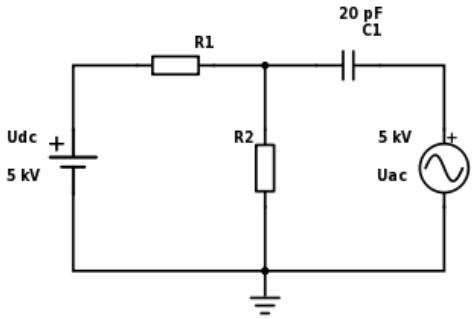
II. PŘÍPRAVA A SIMULACE MĚŘICÍHO OBVODU SLOŽENÉHO NAPĚTÍ

Pro prvotní měření složeného napětí bylo cíleně zvoleno měření na odporové zátěži při relativně nízkých hodnotách napětí, neboť tento experiment nebyl cílen na měření přeskokového napětí, ale pouze na schopnost změřit složené napětí a zároveň ověřit výsledky simulace. Během přeskoku by totiž nebyly jednotlivé zdroje namáhány pouze během měření při normálním režimu, ale také vyššími proudovými hodnotami během přeskoku.



Obrázek I. **Blokové schéma měření složeného napětí [5]**

Na obrázku 2 je vyobrazen návrh experimentálního obvodu, kdy hodnoty napětí stejnosměrného a střídavého zdroje byly předem zvoleny na 5 kV. Kapacita C1 pak slouží jako ochranný prvek pro střídavý zdroj, jejímž úkolem je oddělit střídavý zdroj od stejnosměrného z hlediska napětí a průchozího proudu. Hodnota 20 pF byla vybrána vzhledem k dostupnosti tohoto kondenzátoru v rámci vysokonapěťové laboratoře. Rezistor R1 je ochranný prvek střídavého zdroje mající za úkol utlumit proud procházející do stejnosměrného zdroje směrem ze střídavého zdroje. Nakonec rezistor R2 je prvek, na kterém bude měřeno složené napětí, neboť je umístěn mezi společný bod pro oba zdroje a zem.



Obrázek II. **Schéma zapojení pro měření složeného napětí**

Hodnoty obou rezistorů pak byly vyčísleny na základě požadavku, aby na rezistoru R2 bylo při daném nastavení složené napětí o hodnotě 5 kV – 2,5 kV z každého zdroje. Při uvažování ideálních zdrojů pak lze hodnotu daných rezistorů určit dle následujících rovnic.

$$R = \frac{1}{\frac{U}{U2-1}} \cdot \frac{1}{\omega C1} \tag{1}$$

$$U2 = U \cdot \frac{R2}{R1+R2} \tag{2}$$

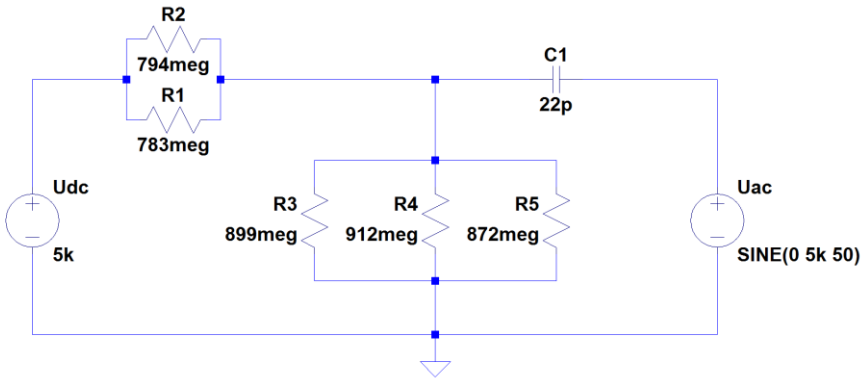
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \tag{3}$$

$$R2 = \frac{U \cdot R}{U - U2} \tag{4}$$

$$R2 = \frac{U \cdot R}{U - U2} \tag{5}$$

Rovnice (1) je sestavena na základě napěťového děliče, který vznikne pohledem ze strany střídavého zdroje. Rovnice (2) je pak naopak tvořena napěťovým děličem tvořeným se strany střídavého zdroje a (3) je pak obecně platná pro paralelní kombinaci rezistorů R1 a R2. Protože tyto rovnice jsou platné zároveň, lze pak z této jednoduché soustavy rovnic vyjádřit rovnice (4) a (5) a po dosazení požadovaných hodnot určit velikosti rezistorů R1 a R2 jako R1 = 289 519 398 MΩ a R2 = 289 519 398 MΩ.

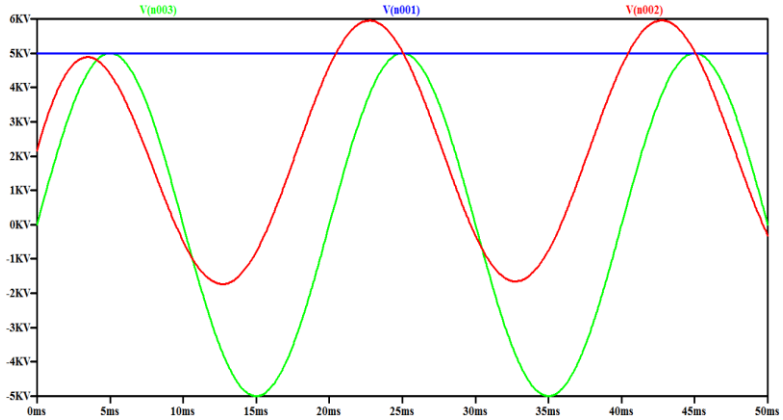
Na obrázku 3 pak lze vidět simulační schéma daného obvodu již za použití reálných rezistorů, které byly v rámci vysokonapěťové laboratoře k dispozici.



Obrázek III. **Schéma simulace obvodu pro měření složeného napětí**

III. VÝSLEDKY SIMULACE A REÁLNÉHO MĚŘENÍ SLOŽENÉHO NAPĚTÍ

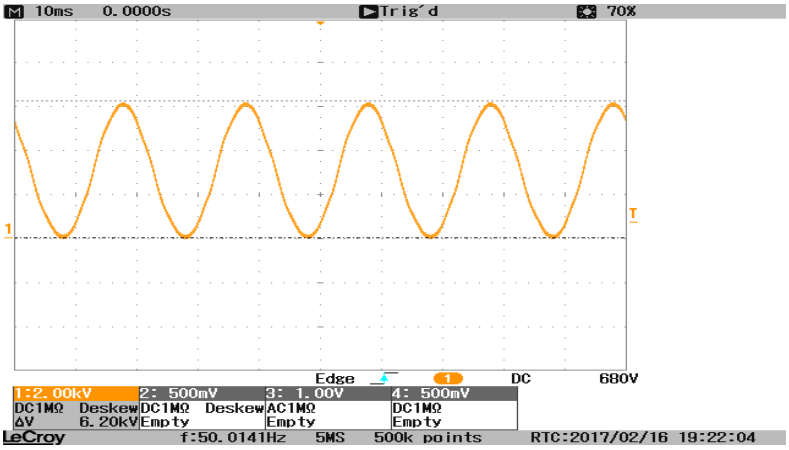
Obrázek 4 vykresluje výsledky simulace, kdy V(n003) je původní střídavé napětí, V(n001) je původní stejnosměrné napětí a V(002) už je pak výsledné složené napětí.



Obrázek IV. **Výsledné nasimulované složené napětí**

Na obrázku 5 je pak zobrazen osciloskopický záznam reálného měření složeného napětí na rezistoru R2. Výsledky simulovaného i reálně naměřeného napětí se pak zdají být shodné.

Lze si ovšem všimnout, že v obou případech dosahuje složené napětí hodnoty okolo 6 kV oproti předpokládaným 5 kV. To může být způsobeno mimo jiné i rozdílem vypočtených a skutečně použitých součástek.



Obrázek V. **Výsledné naměřené složené napětí**

IV. ZÁVĚR

Výsledky simulace složeného napětí se podařilo úspěšně ověřit při reálném měření. Došlo pouze k odchylce mezi předpokládanou maximální hodnotou složeného napětí, která činila 5 kV, a skutečně naměřenou hodnotou 6 kV. Tento rozdíl mohl být způsobený použitím jiné velikosti rezistorů, které byly ve vysokonapěťové laboratoři k dispozici oproti rezistorům, se kterými bylo počítáno. Nasimulované a skutečně naměřené výsledky se od sebe nelišily. Vzhledem k ověření nasimulovaných výsledků pak lze přestoupit k simulaci a následnému měření rozsáhlejšího obvodu a při vyšších napětích.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval prof. Ing. Rainerovi Hallerovi, Dr., doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. a Ing. Petrovi Martínkovi, Ph.D. za cenné rady ohledně problematiky popisované v tomto článku. Tento článek zároveň vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2017-008 a projektu SGS-2015-002: Moderní metody řešení, návrh a aplikace elektronických a komunikačních systémů.

LITERATURA

[1] K. Schon, High impulse voltage and current measurement techniques fundamentals, measuring instruments, measuring methods. Cham: Springer, 2013. ISBN 9783319003788.

[2] W. Mosch, W. Hauschild, M. Kahle, Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid, 1. Aufl. Berlin: Verlag Technik. VEB, 1979, 200 p.

[3] "LTspice Getting Started Guide" http://ltspice.linear.com/

[4] IEC 60060-1 "High Voltage Test Techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements," 2010.

[5] W. Hauschild, E. Lemke, High-Voltage Test and Measuring Techniques, New York: Springer, 2013. ISBN 9783642453519.