

# Aproximace měření průsakových proudů izolačního systému generátorů

Bohumil Paslavský

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Fakulta elektrotechnická

Západočeská univerzita v Plzni

paslaboh@kee.zcu.cz

## Approximation of measurement of leakage current in insulation system of generators

**Abstract** – This paper is focused on measurement and evaluation of leakage current in insulation during DC voltage stress of insulation stator windings. High emphasis put on evaluation and interpretation of results on life cycle of stator winding of generator and it put on used approximation of measured results.

*Keywords* – insulation system; V-A characteristic; DC Hi-pot test; leakage current; deviation from Ohm's law; diagnostic of stator winding

### I. ÚVOD

Správným postupem vyhodnocení naměřených proudů, které tečou izolací statorového vinutí generátoru při zatížení izolace vinutí stejnosměrným napětím, jsme schopni posoudit stav izolačního systému generátoru. Celý postup vyhodnocení naměřených dat se rozpadá na dvě části. Jedna sleduje vývoj vlastností izolace v průběhu daného měření a poskytuje data, která jsou v průběhu měření přímo dostupná a zpracovatelná. Druhá část vyhodnocení zpřístupňuje data na základě širší analýzy, jejíž závěry jsou možné použít k predikci budoucího vývoje vlastností izolace. Je nutné si však uvědomit, že širší analýza z velké části spočívá na matematické aproximaci naměřených dat, přičemž jeden pohled bude uveden v tomto článku.

### II. TEORIE A POUŽITÉ VZTAHY

Při stejnosměrném napěťovém namáhání izolačního systému vinutí, protéká izolací proud skládající se z několika složek, které jsou velmi dobře popsány ve své publikaci G. C. Stone [1]. Při měření průsakový proud po přiložení napětí sledujeme v čase a z poslední odečtené hodnoty ustáleného průsakového proudu vypočítáme odpor izolace, dle Ohmova zákona. Vypočtený izolační odpor se vynásobí s proudem a jeho převrácenou hodnotou do grafu v závislosti na zkušebním napětím - tzv. voltampérová charakteristika izolace. Předpokládané optimální průběhy jednotlivých naměřených veličin jsou uvedeny v technické informaci [4] pro provádění měření průsakových proudů.

O samotné průběžné posuzování protékajícího proudu a dodržení bezpečného napěťového zatížení velmi dobře slouží odchylka od Ohmova zákona (1). Velikost této odchylky vyjadřuje míru odklonu průběhu izolačního odporu od Ohmova zákona, blíže popsáno v [2]. Dle zkušeností z praxe uvedených ve [3], je při hodnotě odchylky větší než 7 dosaženo kritické oblasti, ve které již dochází k trvalým změnám v izolaci jež povedou k průrazu izolačního systému. Vztah pro výpočet směrodatné odchylky je

určen vypočteným izolačním odporem z posledního odečtu prvního napětového stupně zkoušky a podílu proudové a napětové změny posledních stupňů, tj.:

$$K = R_1 \cdot \frac{i_i - i_{i-1}}{u_i - u_{i-1}} \quad (1)$$

Průběžné sledování této hodnoty předchází nadměrnému přetěžování izolačního systému v průběhu zkoušky. Pro přesné hodnocení této veličiny je nutné si zajistit hodnotu ustáleného průsakového proudu, která není ovlivněna časově závislými složkami a vyšší přiloženého napětí. Je tedy doporučeno provádět napětový první krok po dobu delší než 10 minut, běžně se tento interval volí v praxi 20-30 minut, dokud jsou patrné změny ve výchylce proudu. Napětí se volí výrazně nižší než provozní, tak aby všechny nepříznivé vlivy (ionizace apod.) byly minimalizovány.

Další zpracování naměřených výsledků vede k určení teoretického průrazného stejnosměrného napětí pro změřený izolační systém. Tato hodnota je nejlépe určitelná z naměřených hodnot proudu, kdy křivka určená jeho převrácenou hodnotou klesá k nule. Při použití vhodné extrapolace je možné poté provést výpočet, kde hledáme limitu pro  $1/i$  jdoucí k nule z extrapoláční funkce [4]. Tato hodnota nezaručí přesný odhad průrazného napětí, ale při hodnocení vývoje izolačního systému je důležitou proměnnou, která pomůže zmapovat postup provozní degradace izolačního systému v závislosti na době provozu.

### III. MĚŘENÍ, METODIKA A PŘÍPRAVA NA MĚŘENÍ

Měření je prováděno postupně na jednotlivých částech izolačního systému vinutí generátoru a zbylé neměřené části vinutí jsou uzemněny. Pro měření proudu je třeba zajistit dostatečně citlivý ampérmetr až do rozsahu  $10^{-6}$  A, tak abychom mohli spolehlivě odečítat protékající proud přes izolaci. Protékající proud a jeho odečet je ovlivněn geometrickými rozměry, uspořádáním měřicího obvodu, tlumením ručičky použitého ampérmetru, množstvím zkušeností obsluhy při čtení měřených hodnot - tj. měřením velmi malých proudů v průmyslovém prostředí, teplotou a vlhkostí okolního vzduchu, proto by měly být pečlivě zaznamenány podmínky při měření. Samotná měření by se v budoucnu měla odehrávat za co možná nejpodobnějších podmínek - atmosférických, teplotních i přístrojových. Další faktory je možné více či lépe pozitivně ovlivnit, pro lepší a stabilnější výsledky měření - stíněný přívodní VN kabel nebo dostatečné vzdálenosti vodiče bez otřepů od uzemněných částí generátoru, vyložit vhodnou izolací okolí rozpojených a oddálených částí jako jsou vývody vinutí či sběrnice a přístrojové vybavení vývodových skříní.

Vzhledem k vyšší aplikovaného stejnosměrného napětí je nutné dostatečně zabezpečit zkušební prostor a dodržovat všechny bezpečnostní předpisy. Po přiložení napětí na část statorového vinutí prochází obvodem proud, u kterého zaznamenáváme závislost na čase, tak aby jsme získali dostatek hodnot pro budoucí vyhodnocení.

Pokud zdroj napětí nedovoluje skokovou změnu napětí je doporučeno na základě praxe přechod mezi jednotlivými zkušebními hladinami napětí v časovém intervalu menším než 5 sekund. Odečítání proudu na daném zkušebním napětí provádíme v intervalech 60 sekund od přiložení napětí po dobu 10 minut, kdy uvažujeme proud protékající obvodem za ustálený.

#### IV. VÝSLEDKY MĚŘENÍ, HODNOCENÍ DAT Z RŮZNÝCH STROJŮ

První pohled a posouzení izolačního systému stroje dle tohoto zkušební postupu je možné provést na základě časové změny proudu po přiložení daného napěťového stupně. Tímto postupem pro první krok dostáváme absorpční charakteristiku izolace [5]. Pro kroky následující dostaneme charakteristiku vycházející z rozdílu přiložených potenciálů na zkoušený izolační systém.

V tabulce č. 1 ukazují vypočtené posloupnosti odchylky od Ohmova zákona pro řadu měřených napětí u dvou generátorů.

TABULKA I. VÝPOČET ODCHYLKY OD OHMOVA ZÁKONA DLE ROVNICE (1)

Nový generátor DAX62							Generátor elektrárny Levice						
U <sub>N</sub> [kV]		13,8 kV					U <sub>N</sub> [kV]		13,8 kV				
R <sub>1</sub>	I <sub>20min</sub> [μA]			U <sub>20min</sub> [kV]			R <sub>1</sub>	I <sub>20min</sub> [μA]			U <sub>20min</sub> [kV]		
	0,08	0,08	0,08	12,0				0,04	0,04	0,03	5,0		
U <sub>zk</sub> [kV]	I <sub>prusak</sub> [μA]			K [-]			U <sub>zk</sub> [kV]	I <sub>prusak</sub> [μA]			K [-]		
	U	V	W	U	V	W		U	V	W	U	V	W
12,0	0,08	0,08	0,08	-	-	-	5,0	0,06	0,06	0,05	-	-	
15,0	0,10	0,10	0,10	1,0	1,0	1,0	7,5	0,08	0,08	0,07	1,0	1,0	1,3
18,0	0,11	0,11	0,11	0,5	0,5	0,5	10,0	0,10	0,10	0,9	1,0	1,0	1,3
21,0	0,12	0,13	0,12	0,5	1,0	0,5	12,5	0,14	0,14	0,13	2,0	2,0	2,0
24,0	0,13	0,14	0,14	0,5	0,5	1,0	15,0	0,19	0,18	0,15	2,5	2,0	2,0

Na hodnotách pro nový izolační systém můžeme vidět, že hodnota odchylky od Ohmova zákona je menší než jedna. To je způsobeno chybou při odečtu velmi malého proudu, kdy přesná rozlišitelnost odečítaného proudu obsluhou není možná z několika důvodů - kmitání odečítaného proudu, hrubost dílků stupnice a tlumení ručky přístroje. Ve výpočtu je změna hodnoty odchylky 0,5 určena rozdílem v odečteném proudu o 0,01μA.

Možnosti odhadu teoretického stejnosměrného průrazného napětí vychází z vhodné extrapolace převrácené hodnoty naměřených hodnot průsakového proudu. Na regresní funkci, kterou budeme aproximovat naměřené výsledky máme dvě jasné podmínky:

- - řešení regresní funkce musí být v oboru kladných reálných číslech
- - řešení musí být větší než maximální přiložená hladina napětí

Z teoretických úvah víme, že průběh převrácené hodnoty průsakového proudu není lineární, ale při extrapolaci začneme s lineárními funkcemi a budeme sledovat vývoj hodnoty teoretického průrazného napětí. Nejprve aplikujeme proložení lineární funkcí na celou posloupnost převrácených hodnot proudu. Získanou lineární funkci položíme rovnou nule, což odpovídá nulovému napětí na zkoušeném objektu a tím i průrazu izolačního systému. Jednoduchým výpočtem po tomto dosazení získáváme teoretické průrazné napětí pro danou lineární extrapolaci. Při výpočtu je možné posoudit kvalitu aproximace danými body z koeficientu spolehlivosti regrese.

Funkce převrácené hodnoty proudu ve svém průběhu vykazuje jeden inflexní bod, který dělí křivku na konkávní část na levé straně a konvexní část na straně pravé. Toto rozložení není z každého měření patrné a mělo by vést k navýšení počtu měřených napět'ových hladin. Lepší extrapolace by měla být dosažena proložením přímky pouze body z vyšších napět'ových, tak dosáhneme lepšího proložení naměřenými hodnotami, což je patrné i z koeficientu spolehlivosti.

Z výsledků aproximací je patrná potřeba získat naměřené hodnoty z co možná nejvyšší hladiny napětí, tak aby bylo možné v konvexní oblasti křivky zajistit proložení více body. Jednotlivé možnosti aproximace různým počtem bodů jsem provedl na naměřených hodnotách pro nový generátor a generátor před vyřazením z provozu. Z grafů je patrná změna směrnice přímky, kterou prokládáme naměřené hodnoty. Rozptyl hodnot teoretického průrazného napětí pro izolační systém před vyřazením z provozu je menší, než pro nový systém. To odpovídá teoretickým znalostem a možností použití aproximace, kde minimální změna směrnice pro vyšší naměřené hodnoty, to znamená větší rozptyl ve vzdálených hodnotách extrapolace.

## V. ZÁVĚR

Měření průsakových proudů jako každá diagnostická metoda má své přednosti i omezení, ale současně je jednou z metod, která má možnosti sebekontroly. Při správném měřicím postupu přináší výpovědi schopné informace o stavu izolačního systému s možností predikce budoucího postupu stárnutí. V tomto článku zmiňuji pouze možnosti aproximace naměřených hodnot lineární funkcí, která je pro svou jednoduchost vhodná na rychlou a snadnou extrapolaci výsledků, ale nedokáže vhodně položit naměřené body s konvexním charakterem křivky. Otevírá se zde možnost pro použití jiných aproximací, ale je nutné korektně definovat podmínky pro vyhodnocení extrapolovaného průběhu. Upravené podmínky musí respektovat matematické vlastnosti zvolené aproximační funkce.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2016-006, projektu SGS-2016-031 a společnosti BRUSH SEM spol. s r.o..

## LITERATURA

- [1] Electrical Insulation for Rotating Machines – Design, Evaluation, Aging, testing, and Repair, G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter, H. Dhirani, IEEE Press Wiley, 2014.
- [2] Diagnostika elektrických zařízení , V. Mentlík, J. Pihera, R. Polanský, P. Prosr, P. Trnka, BEN, 2008,
- [3] Diagnostika poruch izolací elektrických strojů , A. Barták, L. Mravinač, J. Neumann, J. Vařák, SNTL, 1984.
- [4] Technická informace: Leaking Currents Measurement, P. Krupauer, J. Reindl, BRUSH SEM, 2007,
- [5] Dielektrické prvky a systémy, V. Mentlík, BEN, 2006,