

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ИМПУЛСЕН КОЕФИЦИЕНТ И ИМПУЛСНО СЪПРОТИВЛЕНИЕ НА ВЕРТИКАЛНИ ЗАЗЕМИТЕЛИ

доц. д-р Петър Колев Петров¹, доц. д-р Красимир Маринов Иванов¹,
доц. д-р Георги Цонев Велев¹

¹ Технически университет – Габрово

DETERMINATION OF THE PULSE COEFFICIENT AND RESISTANCE OF VERTICAL GROUNDING DEVICES

Peter Kolev Petrov¹, Krasimir Marinov Ivanov¹, Georgi Tsonev Velev¹

¹ Technical University of Gabrovo, Bulgaria

Abstract

At the flow of high-pulse currents electric spark ruptures occur between the soil particles. That causes a reduction in the grounding resistance. The present paper offers an approach allowing an experimental determination of the pulse coefficient of currents with frequency of 50 Hz for the case of a vertical grounding electrodes. On this basis the pulse resistance value can be estimated.

Keywords: pulse resistance, pulse coefficient, grounding device

ВЪВЕДЕНИЕ

С преразглеждането на Директивата за енергия от възобновяеми източници в ЕС и преминаването ѝ през законодателната фаза се очакват около 605 GW нови възобновяеми мощности до 2030 г., предимно за вятърна и слънчева енергия [5]. Присъединяването на фотоволтаични централи към преносната мрежа високо напрежение може да доведе до нейното претоварване. Ето защо е важно тя да бъде надеждна и да има по малко брой изключения. По време на гръмотевична буря могат да се появят многократни мълнии. Вероятността за възникването на многократна мълния е 0,55. Обикновено в случай на многократна отрицателна мълния амплитудата на тока на първия удар е по-висока от тази на следващите. При следващите удари амплитудите на тока са по-малки, но наклонът на тока е по-голям. По-големият брой прекъсвания на електрозахранването в мрежите за ви-

соко напрежение (110 kV и 220 kV) се дължи на мълнии.

Вероятността за превишаване на пика на тока на мълнията при първия удар на мълнията се представя с формулата на Ериксон-Андерсон:

$$p(I_{1M}) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{I_{1M}}{31}\right)^{2.6}\right)} \quad (1)$$

Средната стойност на тока на мълнията по тази формула е 35,4 kA. За вероятността за превишаване на пиковата стойност на тока на мълнията при следващия удар на мълния може да се използва следната формула:

$$p(I_f) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{I_f}{11.5}\right)^{2.6}\right)} \quad (2)$$

Така разпределението на вероятностите за следващите мълнии е подобно на това за първата мълния, но същите вероятности съответстват на по-малки токове. Средната стойност на тока на мълнията във формула (2) е 11,47 kA. Вероятността за превишаване

на стръмнината на тока на мълнията е, както следва:

$$p(A) = 10^{-\frac{A}{36}} \quad (3)$$

Законът за изчисляване на разпределението на връзката между амплитудата на тока на мълнията и нейната стръмнина е следният:

$$p(I_{1M}, A) = p(A) \cdot p(I_{1M}) \text{ или} \\ p(I_{1M}, A) = 10^{0.666 - \sqrt{\frac{I_{1M}}{25} - \frac{A}{36}}} \quad (4)$$

Най-голямата опасност за изолацията на въздушните линии за високо напрежение представляват така наречените "обратни" пробиви. За анализа на този случай се вземат предвид следните допускания: първият и последващите удари на мълниите възникват в стълба или в мълниезащитното въже, но в близост до стълба. Първият удар на мълния предизвиква обратен пробив през изолаторите на стълба, въздушната линия е изключена от близката подстанция (другата страна остава включена), последващият удар настъпва преди изключването от другата страна.

За инженерни изчисления може да се използва следната формула за изчисляване на минималната амплитудна стойност на тока на мълнията при първия удар на мълния, който предизвиква обратен пробив:

$$I_{1M} = \frac{1}{ksi \cdot R_E} \left[\frac{1.1U_{50\%}^+}{1 - k_B} - A_1(h + L_M + M) \right], \quad (5)$$

където обозначенията имат следното значение: R_E - съпротивлението на заземяване на стълба; ksi - коефициент, показващ частта на тока на мълнията през стълба ($ksi=0,8$ за стълб с мълниезащитно въже); k_B - коефициент, показващ връзката между фазовите проводници и заземителния проводник ($k_B = 0,15 - 0,25$); M - взаимната индуктивност между проводниците и главния канал на мълнията, $M=0,2h_M(6,15-\ln(H_M))$, h_M - височината на проводника при стълба, H_M - височината на стълба, L_M - самоиндуктивността на стълба, $L_M=0,6H_G$, H_G - височината на окачването на изолатора при

стълба; h - средната височина на фазовия проводник; $U_{50\%}^+$ - импулсно издържащо напрежение с положителна полярност.

При преминаването на въздушните в кабелни линии, последните се защитават от пренапрежения с нелинейни ограничители на пренапрежения (НОП) [9], за да се ограничи постъпването в тях на вълни от атмосферен характер.

Вижда се, че при изчисления на тока на мълнията е много важно да се знае точната стойност на съпротивлението на заземителя.

1. СЪСТОЯНИЕ НА ЗАЗЕМИТЕЛЯ ПРИ ПРОТИЧАНЕ НА ГОЛЕМИ ИМПУЛСНИ ТОКОВЕ.

Най-често големи по стойност импулсни токове протичат през заземителя при удар от мълнии, ако последния се използва като елемент от мълниезащитна инсталация.

Амплитудата на тока на мълнията достига десетки километри. При протичане на големи импулсни токове, каквито са токовете на мълниите, съпротивлението на заземителите намалява [6]. Това се дължи на появата на електрически искрови пробиви между почвените частици.

Отношението между импулсното съпротивление R_E и съпротивлението на заземителя R_3 при токове с честота 50 Hz представлява импулсният коефициент т.е. връзката между двете съпротивления може да се запише така:

$$R_E = \alpha_i R_3 \quad (6)$$

където: α_i - импулсен коефициент.

При увеличаване на съпротивлението на заземителя стойностите на токовете на мълниите, които предизвикват обратни пробиви, се намаляват, тоест увеличава се вероятността за такива пробиви. Това може да доведе до повишен брой изключвания, което не е желателно. Поради това се налага да се извършва оценка на посочения момент и вземане на съответни мерки. Импулсното съпротивление се определя на базата на измере-

ното съпротивление на заземителя R_3 като същото се коригира с импулсния коефициент α_i по (6).

Последният се взема от таблици в зависимост от специфичното обемно съпротивление на почвата ρ_{II} и измереното при 50 Hz съпротивление на заземителя R_3 . Границите са размити, а избора на α_i става чисто субективно. При условие, че стойността на ρ_{II} не бъде измерена за конкретния случай, а се вземе по описание на състава на почвата от таблица грешката при определяне на R_E може да бъде значителна.

В настоящия доклад се цели извеждането на аналитичен израз за α_i за вертикални заземители и съответния вид почва. От получената формула може да се направи извод за изменението на α_i и R_E в зависимост от големината на протичащия ток.

2. ПОДХОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ ИМПУЛСНОТО СЪПРОТИВЛЕНИЕ НА ВЕРТИКАЛЕН ЗАЗЕМИТЕЛ.

Посочения по-горе проблем ще бъде решен при определени допускания, а именно:

- тъй като дължината на заземителя е много по-голяма от неговото сечение се допуска, че искрообразуването между земните частички става само в радиално направление спрямо оста на заземителя;

- искрообразуването в заострената част на заземителя се пренебрегва;

От направените допускания следва, че интензитета на полето E във функция от текущия радиус r ще бъде:

$$E = \frac{I \cdot \rho_{II}}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l} \quad (7)$$

където: l – дължината на заземителя.

Радиусът на йонизираната зона r_i може да се определи, ако в (7) се замести E с пробивния интензитет $E_{ПР}$.

$$r_i = \frac{I \cdot \rho_{II}}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot E_{ПР}} \quad (8)$$

Тъй като радиусът на йонизираната зона r_i е по-голям от радиуса на вертикалния заземител r_3 , то на практика се получава заземител с по-голямо сечение, от където следва, че неговото съпротивление ще бъде по-малко. Ако заместим във формулата за определяне съпротивлението на вертикален заземител R_3 [1] радиуса r_3 с r_i ще се получи импулсното съпротивление R_3 на вертикалния заземител:

$$R_3 = \frac{0.366 \cdot \rho_{II}}{l} \lg \frac{4l}{2r_3} = \frac{0.366 \cdot \rho_{II}}{l} \lg \frac{4 \cdot \pi \cdot l^2 \cdot E_{ПР}}{I \cdot \rho_{II}} \quad (9)$$

От (6) следва, че α_i ще бъде:

$$\alpha_i = \frac{R_E}{R_3} = \frac{\lg \frac{4 \cdot \pi \cdot l^2 \cdot E_{ПР}}{I \cdot \rho_{II}}}{\lg \frac{2l}{r_3}} = B \cdot \lg \frac{4 \cdot \pi \cdot l^2 \cdot E_{ПР}}{I \cdot \rho_{II}} \quad (10)$$

където $B = \frac{1}{\lg \frac{2l}{r_3}}$.

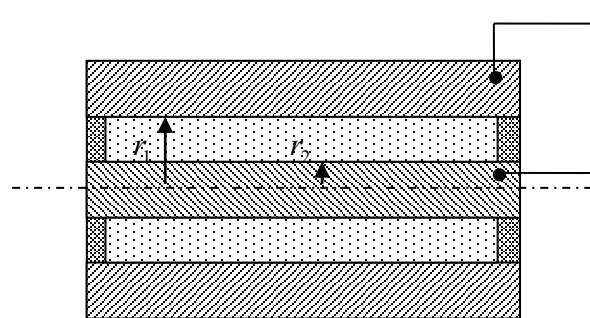
За определянето на α_i от (5) е необходимо да се знае стойността на $E_{ПР}$. В [4] експериментално са определили $E_{ПР}$ в зависимост от специфичното обемно съпротивление на почвата ρ_{II} (Таблица 1). Последното може да бъде измерено [2].

Таблица 1

Вид почва	Глина	Пясък	Пясък с чакъл		Пясък с глина
$\rho_{II} \cdot \Omega m$	870	1600	3100	500	500
$E_{ПР}, \frac{kV}{cm}$	1.3	2	0.7	1.1	3

$E_{ПР}$ може да бъде определено и експериментално като се вземе проба от съответната почва, където ще бъде монтиран или е монтиран заземителя. Необходимо е същата да бъде загрята за отстраняване на влагата от нея. Поставя се като пъл-

неж на цилиндричен кондензатор както е показано на фиг. 1.



Фиг.1 Схема на цилиндричен кондензатор

За цилиндричен кондензатор е в сила зависимостта:

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q}{2\pi \cdot \epsilon \cdot l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (11)$$

Интензитетът на полето E във функцията от текущия радиус r може да бъде изчислен чрез заряда q от (6)

$$E = \frac{q}{2\pi \cdot \epsilon \cdot l \cdot r} = \frac{U}{r} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right)^{-1} \quad (12)$$

В (12) максималната стойност $E_{max} = E_{ПР}$ се получава при $r = r_1$, от където следва израз за експериментално определяне на $E_{ПР}$ в зависимост от измереното пробивно напрежение $U_{ПР}$ за дадения вид почва.

$$E_{ПР} = \frac{U_{ПР}}{r} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right)^{-1} \quad (13)$$

3. ПРАКТИЧЕСКО ИЗПОЛЗВАНЕ НА НАПРАВЕНИТЕ ИЗВОДИ.

Като се вземе проба от съответната почва по (13) експериментално може да се определи $E_{ПР}$. От (10) за конкретния заземител ($r_3 = const, l = const$), може да се определи функционалното изменение $\alpha_i = f(I\rho_{П})$. Полученият импулсен коефициент може да се коригира със сезонния коефициент φ в зависимост от пре-

обладаващите метеорологични условия в дадения район, където се намира обекта.

Ще използваме следните данни:

$E_{ПР} = 3 \text{ kV/cm}; \quad l = 2 \text{ m}; \quad r_3 = 25 \cdot 10^{-3} \text{ m},$
 $\rho_{П} = 500 \text{ } \Omega\text{m}$ (пясък и глина).

Функционалната зависимост на импулсния коефициент $\alpha_i = f(I\rho_{П})$ при тези данни е дадена в Таблица 2.

Таблица 2

$\alpha_i = f(I \cdot \rho_{П})$	0.93	0.80	0.67	0.53	0.45	0.39	0.35	0.31
$I \cdot \rho_{П}, \text{ kA} \cdot \Omega \cdot \text{m}$	125	250	500	1000	1500	2000	2500	3000
$I, \text{ kA}$	0.25	0.50	1	2	3	4	5	6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направен е опит за определяне на импулсния коефициент на основа на експериментални резултати, а оттам и импулсното съпротивление на вертикален заземител. Стойностите на импулсното съпротивление на заземителя са важни за определяне на различни инженерни зависимости в ТВН.

REFERENCE

- [1] Mitov B. S., M.G. Vylchev, I. K. Ivanov – Fundamentals of Technical Safety – Tehnika, Sofia, 1977.
- [2] Kolev S., N. Gyrkov etc. - Laboratory Measurements in Occupational Safety – Profizdat, 1987
- [3] CIGRE Working Group C4.2.02: “Methods for measuring the earth resistance of transmission line towers equipped with earth wires”, CIGRE Publication, 2005.
- [4] EEA Guide to Power System Earthing Practice Rev 07, December 2007, MEL-R168 Rev 07
- [5] Gankova-Ivanova, Zw., Erneuerbare Energie-quellen und Beschäftigung, Technologies and Education for a Smart World, Proceedings of the 8th FDIBA Conference, Sofia, Bulgaria, 30 November, 2020, s. 1-3,

- [6] Hideki Motoyama, “Experimental and analytical studies on lightning surge characteristics of ground mesh”, *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 160, No.4, pp. 16-23, September 2007
- [7] Live A.C., Darveniza M – Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths – *Proc.IEE*, 1974, N2, p.121-135
- [8] Steve Mackay, *Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection*, Newnes, 2004
- [9] Tudorache, Adriana, Josef Timmerberg, Daniela Cîrțînă, Liviu Marius Cîrțînă, Partial Capacities and Operating Capacity of a Shielded Three-phase Cable by Means of Complex Potential – Case Study, *Annals of the „Constantin Brancusi” University of Targu Jiu, Engineering Series*, No. 2/2021, Romania, ISSN 1842-4856, pp. 185 – 188 (4p.)
- [10] Tudorache, Adriana, Francisc Comarlă, Josef Timmerberg, A Step Towards Energy Transition - Part II, *Annals of the „Constantin Brancusi” University of Targu Jiu, Engineering Series*, No. 3/2022, Romania, ISSN 1842-4856, pp. 94 – 99 (6p.)