

Bystrík Dolník

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

Štatistická analýza prepätí v sieti nízkeho napätia

Abstrakt. Spínacie prepätia a ochrana elektrických zariadení pred prepätiami je stále predmetom záujmu. Spínacie prepätia nepriaznivo pôsobia na izoláciu elektrických zariadení, pričom často je táto prepäťová udalosť sprevádzaná elektromagnetickou interferenciou. V článku sú opísané niektoré typické charakteristiky spínacích prepätí namerané na zariadeniach pripojených do elektrickej siete nízkeho napätia. Na vyjadrenie charakteristík sú aplikované základné nástroje matematickej štatistiky.

Abstract. Overvoltage phenomena due to switching of electric equipments is topical problem. Switching overvoltages have negative influence on the insulation of the electric equipments and often the electromagnetic interference occurs. In this article some typical characteristics of the switching overvoltages in low voltage electric loads are described. For this purpose the mathematical statistics on measured data of overvoltages are introduced. (Statistical analysis of overvoltages in low voltage networks).

Kľúčové slová: izolácia, prepätie, štatistika.

Keywords: insulation, overvoltage, statistics.

Úvod

Elektrické zariadenia používané v elektroenergetike sú dnes oveľa citlivejšie ako tomu bolo pred dvadsiatimi rokmi. Počet pripojených zariadení (záťaže) na strane odberateľa sa zvýšil a je predpoklad, že ešte určitý čas bude narastať. Patria sem napr. počítače, komunikačné zariadenia, rôzne elektronicky riadené zdroje používané na napájanie výkonových zariadení, zariadenia v zdravotníctve a pod. Tieto zariadenia reprezentujú typický príklad záťaží, ktoré sú citlivé na poruchy v napájacej sieti. Lenže aj samotné záťaže môžu byť zdrojmi porúch a prepätí. Všeobecne platí, že akékoľvek spínanie, vznik poruchy, prerušenie dodávky elektriny v elektrickej sieti spôsobí prechodný dej, ktorý môže byť sprevádzaný prepätím. S problematikou prepätí zaoberá sa taktiež vedný odbor elektromagnetická kompatibilita. Spínacie prepätia možno charakterizovať rôznymi spôsobmi pričom najčastejšie sa používajú tieto parametre:

1. amplitúda,
2. trvanie
3. U_t integrál, ktorý je definovaný nasledovne

$$U_t = \int U(t) d(t), \quad (1)$$

kde: t – čas, U – napätie.

Hranice integrovania sú tieto: dolná hranica – začiatok prepäťovej udalosti $t = 0$, horná hranica napr. čas, za ktorý napätie dosiahne 10 % maximálnej hodnoty. Napätie $U(t)$ možno merať alebo od nuly alebo od okamihu odklonu od sínusového napätia v ustálenom stave. Prepätia možno klasifikovať aj podľa ich trvania nasledovne: extrémne krátke, krátke, dlhé a extrémne dlhé. Monitorovanie kvality elektrickej siete štandardne zaznamenávajú napätie, prúd, fázový posuv, napäťovú symetriu a pod., niektoré majú možnosť záznamu udalosti po splnení nastavenej trigovacej podmienky.

Prepäťové udalosti sú klasifikované podľa rôznych kritérií, niektoré už boli spomenuté vyššie. Prepätia s extrémne krátkym trvaním a veľkými amplitúdami vznikajú najmä počas búrkovej činnosti pri priamom zásahu blesku do zariadenia alebo vedenia a niektoré prepäťové udalosti spôsobené spínaním (hlavne v zapúzdrených zariadeniach s plynovou izoláciou SF₆ alebo dusík. Prepäťové udalosti s krátkym a dlhým trvaním sú typické počas spínania v elektrickej sieti alebo ako reakcia na atmosférickú prepäťovú udalosť.



Obr. 1 Klasifikácia prepätí podľa ich trvania

Na kvalitatívne vyjadrenie prepätí používa sa najviac tzv. koeficient prepätia k_p , ktorý sa vypočíta ako podiel amplitúdy prepätia a pomernej jednotky definovaná podľa (3)

$$k_p = \frac{U_{mp}}{p. j.}, \quad (2)$$

kde: k_p – koeficient prepätia, U_{mp} – amplitúda prepätia, p. j. – pomerná jednotka.

Pomerná jednotka v jednofázovej elektrickej sieti sa vypočíta ako súčin efektívnej hodnoty fázového napätia a odmocniny z dvoch (3); v trojfázovej sieti zase ako podiel amplitúdy napätia siete k odmocnине z troch (4)

$$p. j. = U \cdot \sqrt{2}. \quad (3)$$

$$p. j. = \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}. \quad (4)$$

V elektrických sieťach nízkeho napätia vyskytujú sa prepätia hlavne z dôvodu spínania. Spínanie môže byť mechanické alebo pomocou elektronických spínacích prvkov. Charakter spínania má vplyv na prechodný dej, pretože akákoľvek rýchla zmena v elektrickom obvode s kapacitami a indukčnosťami vyvolá prechodný dej, ktorý má často charakter prepätí. Tieto sa ďalej šíria po metalickom vedení k ostatným pripojeným zariadeniam. Na modelovanie prepätí v obvodoch s krátkymi vodičmi možno použiť sústredené parametre. Dlhé vodiče (vedenia) pomocou modelov s rozloženými parametrami.

Návrh a príprava experimentu

V experimente som zisťoval vlastnosti spínacích prepätí, ktoré boli generované manuálnym spínaním (zapínanie a vypínanie) elektrických zariadení na nízke napätie s malým

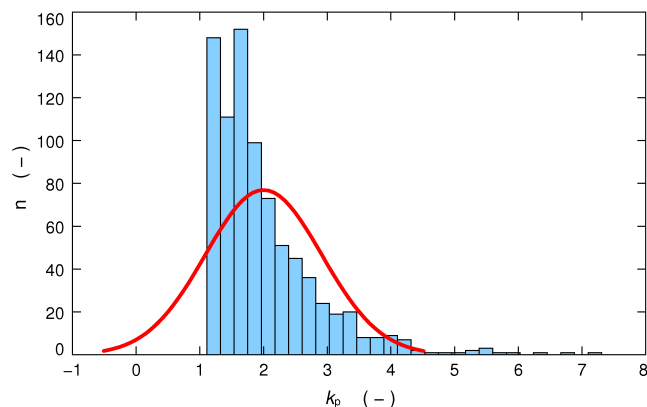
výkonom pomocou mechanického spínača. Boli použité tieto zariadenia: jednofázový sieťový transformátor, osobný počítač, vŕtačka, chladnička, žiarivka, klasická žiarovka a kondenzátor. Vybrané zariadenia reprezentujú rôzne typy záťaží: ohmická (žiarovka), prevažne indukčná (sieťový transformátor, vŕtačka) a prevažne kapacitná (kondenzátor). Zariadenia boli pripojené do rozvodu elektrickej energie s nízkym napätím 230/400 V, 50 Hz. Priebeh napätia bol meraný pomocou odporového deliča napätia. Niektoré zariadenia generovali prepätia aj počas činnosti v zapnutom stave. Analýza a vyhodnotenie vypočítaných dát bola urobená pomocou matematickej štatistiky, predpokladal sa náhodný výber. Náhodný výber je charakterizovaný nasledujúcimi predpokladmi:

1. Jednotlivé prvky výberu X_i sú stochasticky nezávislé.
2. Výber je homogénny, t.j. všetky X_i pochádzajú z rovnakého rozloženia pravdepodobnosti s konštantným rozptylom.
3. Klasické metódy matematickej štatistiky sú založené na predpoklade normality.
4. Všetky prvky súboru majú rovnakú pravdepodobnosť, že do náhodného výberu budú zaradené.

Uvedené predpoklady tvoria základ vyhodnocovania realizácií náhodných výberov štatistickými metódami.

Vyhodnotenie experimentu

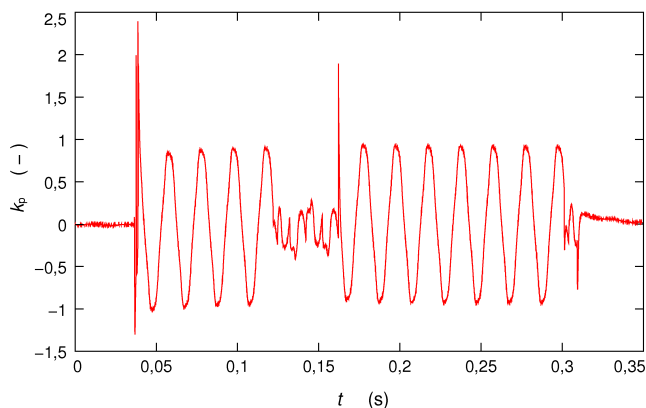
Na vyhodnotenie prepätí, stanovila sa prahová hodnota 10 % nad amplitúdou menovitého fázového napätia v jednofázovej sieti. To znamená, že koeficienty $1 < k < 1,1$ sa pri vyhodnotení nebrali do úvahy. Počas experimentu bolo celkovo nameraných 825 prepätových udalostí podľa uvedeného kritéria, amplitúda prepätí sa pohybovala od prahovej hodnoty až do jednotiek kilovoltov (1–2,2 kV).



Obr. 2 Histogram a graf normálneho rozdelenia koeficientu prepätia k_p všetkých nameraných prepätových udalostí

V prípade analýzy prepätí, ktoré boli generované vŕtačkou treba pripomenúť, že okrem napäťového namáhania izolácie, spôsobujú aj rušiacie napätia v sieti cez galvanickú väzbu a rušiacie polia cez elektromagnetickú väzbu. Podobné výsledky prepätí namerali sa na žiarovke. Maximálna nameraná hodnota prepätia bola 1,98 kV, pričom prepätia boli generované ako pri zapínaní, tak aj pri vypínaní, pozri obr. 3. Keďže sa jedná o prevažne odporovú záťaž, vzniknuté prechodné deje a s tým spojené oscilácie počas spínania možno pripísať rezonančnému obvodu, ktorý je tvorený parazitnými kapacitami a indukčnosťou napájacích prívodov k žiarovke.

Amplitúda generovaného prepätia je závislá, okrem už spomínaných faktorov, aj od mechanickej konštrukcie použitého spínacieho prvku. Spínanie osobného počítača vyvolávalo iba veľmi malé prepätia, ktoré nemajú podstatný vplyv na namáhanie izolácie pripojených elektrických zariadení.



Obr. 3 Časový priebeh spínania žiarovky

Spínanie jednofázového motora bez mechanickej záťaže a podobne aj spínanie jednofázového transformátora bez záťaže (napríklad) spôsobilo generovanie prepätí do 2 kV. Krátke zhrnutie nameraných maximálnych amplitúd prepätia na vybraných elektrických zariadeniach, je uvedené v tab. 1.

Tabuľka 1. Maximálna amplitúda prepätia nameraná na vybraných elektrických zariadeniach

Elektrické zariadenie	Amplitúda prepätia (V)	Koeficient prepätia (-)
Jednofázový elektromotor	1 675,25	5,15
Kondenzátor	1 096,25	3,37
Jednofázový transformátor	2 228,00	6,85
Vŕtačka	2 377,75	7,31
Žiarovka	1 976,25	6,08

Diskusia

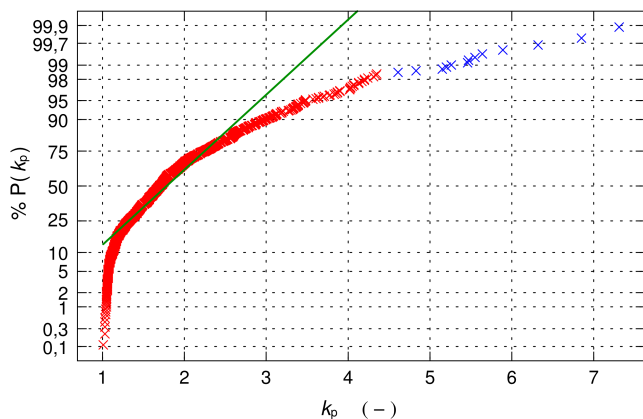
Ako už bolo spomenuté vyššie, na analýzu a vyhodnotenie dát použili sa nástroje matematickej štatistiky: minimum, 1. kvartil, medián, 3. kvartil, maximum, priemer, štandardná odchýlka, šikmosť a špicatosť. Pre štatistickú analýzu bol uvažovaný štatistický súbor, ktorý obsahuje všetky namerané koeficienty prepätia. Prehľad vybraných štatistík je uvedený v tab. 2.

Tabuľka 2. Prehľad vybraných štatistík koeficientov prepätia

Minimum	1. kvartil	Medián	3. kvartil	Maximum	Priemer	Šikmosť
1,11	1,44	1,76	2,33	7,31	2,0	2,0311

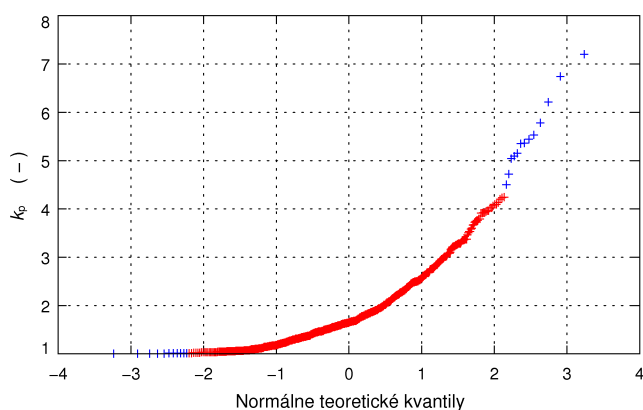
Koeficient prepätia vypočítal sa podľa (2). Okrem číselného vyjadrenia štatistík, ktoré sú uvedené v tab. 2, použili sa ešte diagnostické grafy pre účel prieskumnej analýzy. Účelom prieskumnej analýzy dát je odhaliť zvláštnosti a overiť predpoklady vybranej vzorky dát pre ďalšie spracovanie. Histogram uvedený na obr. 2 ponúka lepšiu interpretáciu vypočítaných koeficientov prepätia. Ako možno vidieť z histogramu na obrázku, najväčší počet prepätových udalostí (152) zodpovedá koeficientom prepätia v rozsahu od 1,54 do 1,75. Túto skutočnosť, pre uvažovaný štatistický súbor, viac vystihuje medián, ktorý má hodnotu 1,76 ako priemer s hodnotou 2,0. Krivka preložená cez histogram na obr. 2 reprezentuje graf hustoty normálneho rozdelenia.

Na obr. 4 je zobrazený normálny pravdepodobnostný graf. Jedná sa o graf, ktorý porovnáva namerané hodnoty (v našom prípade vypočítané koeficienty prepätia) s ich očakávanými hodnotami a označuje sa aj ako P-P graf a v prípade normálneho rozdelenia body sa nachádzajú blízko tejto priamky. Na obr. 4 vidno, že usporiadané dvojice (vypočítané dáta) sú zoradené do konkávnej krivky, čo značí, že štatistický súbor má kladnú šikmosť (2,0311 – porov. v tab. 2) a zároveň nespĺňajú podmienku pre normálne rozdelenie.



Obr. 4 Normálny pravdepodobnostný graf pre všetky vypočítané koeficienty prepätia

Veľmi výraznú šikmosť má napríklad exponenciálne rozloženie. Šikmosť patrí medzi parametre tvaru a je mierou asymetrie rozloženia. Pre symetrické rozloženia je rovná nule. Odľahlé (odklonené) hodnoty sú vyznačené modrou farbou. Medzi parametre tvaru patrí aj špicatosť a vyjadruje koncentráciu rozloženia počtosti okolo priemeru. Normálne rozloženie má špicatosť rovnú nule. Špicatosť narastá s rastúcimi obojstranne odklonenými dátami. V tomto prípade je špicatosť rovná 6,123.



Obr. 5 Kvantil-kvantilový graf pre všetky vypočítané koeficienty prepätia

Na obr. 5 je zobrazený Q-Q graf koeficientov prepätia pre všetky namerané dáta. V grafe sú vynesené vypočítané dáta (koeficienty prepätia – skutočné hodnoty) voči teoretickým kvantilom (kvantily štandardného normálneho rozloženia s priemerom 0 a štandardnou odchýlkou 1) [6]. Q-Q graf umožňuje posúdiť, či dátový súbor pochádza z nejakého známeho rozloženia. Z jeho tvaru dá sa posúdiť symetria, normalita, špicatosť a homogenita výberu. Z obr. 5 vidno, že rozdelenie nie je normálne, lebo body neležia na priamke. Majú kladné zošikmenie – jedná sa o konvexnú krivku. Z toho vyplýva, že použitie aritmetického priemeru ako odhadu strednej hodnoty by bolo nesprávne. V takýchto prípadoch je lepšie používať medián. Odľahlé hodnoty sú vyznačené modrou farbou.

Záver

V experimente sa analyzoval výskyt prepätí generovaný spínaním jednofázových elektrických zariadení používané v sieťach nízkeho napätia: osobný počítač, jednofázový sieťový transformátor, vŕtačka, chladnička, žiarovka a žiarivka. Na analýzu nameraných dát sa použili nástroje štatistiky. Priemerná hodnota koeficientu prepätia zo všetkých 825 nameraných udalostí je 2,00. Najväčšia

početnosť koeficienta prepätia sa pohybovala od 1,54 do 1,75 pre všetky elektrické zariadenia spolu. Pre štatistické vyhodnotenie nameraných dát sa použilo normálne (Gaussovo) rozdelenie. Interpretácia dát bola urobená pomocou histogramu počtosti, hustoty normálneho rozdelenia pravdepodobnosti, kvantil-kvantilovými grafmi (Q-Q graf) a pravdepodobnostnými grafmi (P-P graf).

Literatúra

- [1] S. D. MacGregor, An overview of power quality issues and solutions. In: *Proceedings of 40th IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference*, 1998. Rapid City, South Dakota, USA. pp. 57–64. USA: IEEE. ISBN 0-7803-3941-X.
- [2] I. Locatelli, A. Marazzi, V. J. Yohai, Robust accelerated failure time regression. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2011. vol. 55, no. 1, pp. 874–887. ISSN 0167-9473.
- [3] M. H. J. Bollen, Overview of Power Quality and Power Quality Standards, [on-line]. [cit. 2007-06-14], p. 2–3, p. 14–15, p. 20–22, <http://media.wiley.com/product_data/excerpt/37/07803471/0780347137.pdf>.
- [4] M. H. J. Bollen, I. Yu-Hua Gu, ORIGIN OF POWER QUALITY VARIATIONS. In: *Signal Processing of Power Quality Disturbances*, pp. 41–161, (2006). USA: Wiley-IEEE Press.
- [5] M. H. J. Bollen, I. Yu-Hua Gu, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*, (2006). USA: Wiley-IEEE Press. ISBN 0-471-73168-4.
- [6] M. C. Wang, B. J. Bushman, Using the Normal Quantile Plot to Explore Meta-Analytic Data Sets, In: *Psychological Methods*, vol. III, No. 1, 1998, [on-line]. [cit. 2007-06-25], p. 49–50, <<http://www.sitemaker.umich.edu/brad.bushman/files/wb98.pdf>>.
- [7] W. D. Tan, F. F. Gan, T. C. Chang, Using normal quantile plot to select an appropriate transformation to achieve normality. In: *Computational Statistics & Data Analysis*, 2004. vol. 45, no. 3, pp. 609–619. ISSN 0167-9473.
- [8] J. Beirlanta, W. Glänzel, A. Carbonez, Scoring research output using statistical quantile plotting. In: *Journal of Informetrics*, (2007). vol. 1, no. 3, pp. 185–192. ISSN 1751-1577.
- [9] J. Liang, W. S. Y. Pan, Z.-H. Yang, Characterization-based Q-Q plots for testing multinormality. *Statistics & Probability Letters*, 2004. vol. 70, no. 3, pp. 183–190. ISSN 0167-7152.
- [10] A. Lemonte, G. M. Cordeiro, The exponentiated generalized inverse Gaussian distribution. *Statistics & Probability Letters*, 2011. vol. 81, no. 4, pp. 506–517. ISSN 0167-7152.
- [11] S. Perera, Transient Overvoltages on the Electricity Supply Network – Effects on Connected Equipment and their Mitigation, Technical Note, *Power Quality and Reliability Centre*, vol. 9 pp. 12, August 2006, [on-line]. <<http://www.elec.uow.edu.au/ieqrc/files/technote9.pdf>>.
- [12] S. Perera, Transient Overvoltages on the Electricity Supply Network – Classification, Causes and Propagation, Technical Note, *Power Quality and Reliability Centre*, vol. 8, pp. 11, April 2005, [on-line]. <<http://www.elec.uow.edu.au/ieqrc/files/technote8.pdf>>.
- [13] M. Zhang, K. Li, Y. Hu, A real-time classification method of power quality disturbances. *Electric Power Systems Research*, 2011. vol. 81, no. 2, pp. 660–666. ISSN 0378-7796.
- [14] R. C. Sermon, An overview of power quality standards and guidelines from the end-user's point-of-view. In: *IEEE Proceedings of Rural Electric Power Conference, San Antonio, Texas, USA, May 8–10 2005*. pp. (B1/1–B1/5). ISBN 0-7803-8958-1.



Európska únia



Operačný program
VÝSKUM A VÝVOJ

Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku / Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. Tento článok bol vypracovaný v rámci projektu „Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a využitia progresívnych

materiálov a technológií v oblasti automobilovej elektroniky“, ITMS 26220120055.

Autori: Bystrík Dolník, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: Bystrik.Dolnik@tuke.sk