

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vytýčení oblasti ohrožení odběratelů citlivých na
velikost napájecího napětí**

vedoucí práce: doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.

2013

autor: Martin Hebr

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin HEBR**
Osobní číslo: **E11N0012P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Vytýčení oblasti ohrožení odběratelů citlivých na velikost napájecího napětí**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište zařízení a technologie citlivé na velikost napájecího napětí.
2. Proveďte teoretický rozbor stanovení napěťových poměrů při zkratové poruše v síti.
3. Popište metody pro vytýčení oblastí ohrožení a porovnejte jejich použitelnost v praxi.
4. Pro modelový případ stanovte hranice oblastí ohrožení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Bollen, M.H.J. - Understanding power quality problem: voltage sags and interruptions, New York, IEEE Press, 1999.
2. Mertlová, J., Hejtmánková, P., Tajtl, T. : Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie, ZČU, Plzeň, 2004.
3. Hodinka, M., Fecko, Š., Němeček, Fr.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL Praha, 1989.
4. Dugan, Roger C.: Electrical power systems quality /2nd ed. New York, 2003.
5. Tesařová, M.: Výpočtové metody pro predikci poklesů napětí, ZČU v Plzni, 2006.

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.

Katedra elektroenergetiky a ekologie


Datum zadání diplomové práce: 15. října 2012

Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2013


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Diplomová práce se zaměřuje na problematiku poklesů napětí. Nejprve je stručně rozebrána kvalita elektrické energie z pohledu odběratele a příčiny, které ji mohou ovlivnit. Poté se již soustředí přímo na poklesy napětí. Jsou zde popsány příčiny vzniku a vlastnosti poklesů napětí. Práce taktéž obsahuje přehled zařízení citlivých na poklesy napětí včetně charakteristiky jejich chování při tomto jevu. K předpovědi poklesů napětí se využívají výpočtové metody. Dvě nejpoužívanější jsou zde podrobně popsány a následně jedna aplikována na modelový příklad sítě. Z výsledných výpočtů je určen počet poklesů napětí za jeden rok znázorněný pomocí histogramu a oblast ohrožení.

Klíčová slova

Kvalita elektrické energie, napěťové události, průběžné jevy, poklesy napětí, zařízení citlivá na poklesy napětí, výpočtové metody, metoda kritických vzdáleností, metoda míst zkratů

Abstract

The thesis deals with problems of the voltage sags. There are briefly analysed the power quality from the buyer's point of view and causes affecting it. The thesis is focused on the voltage sags, then. The are described causes of characteristics and source of the voltage sags. The thesis involves the summary of equipments sensitive to voltage sags including of characteristics of their behaviour by this event. There are used the calculation methods for prediction of voltage sags. Two of the most used methods are described in the thesis. One of them is used for an example of the net. According to the final calculation is stated the quantity of voltage sags in one year depicting by histogram and area of threat.

Key words

Power quality, voltage events, continuous events, voltage sags, equipment sensitive to voltage sags, calculation methods, method of critical distances, method of fault positions

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 8.5.2013

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce paní doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za pomoc a věcné rady v průběhu tvorby práce. Rád bych také poděkoval své rodině a nejbližším za podporu, kterou mi prokazovali po celou dobu studia.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	11
1. KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE	12
1.1. PARAMETRY KVALITY DODÁVANÉ ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	13
1.2. CHARAKTERISTIKY A PŘÍČINY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU ELEKTRICKÉ ENERGIE .	13
1.2.1. <i>Průběžné jevy.....</i>	<i>14</i>
1.2.2. <i>Napěťové jevy</i>	<i>17</i>
2. POKLESY NAPĚTÍ.....	18
2.1. CHARAKTERISTIKA POKLESU NAPĚTÍ.....	19
2.2. VZNIK POKLESU NAPĚTÍ.....	20
2.2.1. <i>Poklesy v důsledku poruch v síti.....</i>	<i>20</i>
2.2.2. <i>Poklesy v důsledku spínání velkých zátěží.....</i>	<i>23</i>
2.2.3. <i>Poklesy způsobené rozběhy transformátorů a nabíjením kapacit</i>	<i>24</i>
2.3. VYHODNOCOVÁNÍ NAPĚŤOVÝCH UDÁLOSTÍ Z HLEDISKA POKLESŮ NAPĚTÍ....	25
2.4. ZAŘÍZENÍ CITLIVÁ NA POKLESY NAPĚTÍ	28
2.4.1. <i>Stykače.....</i>	<i>29</i>
2.4.2. <i>Přímo připojené asynchronní motory.....</i>	<i>32</i>
2.4.3. <i>Řízené pohony.....</i>	<i>34</i>
2.4.4. <i>Tyristory řízená zařízení.....</i>	<i>39</i>
2.4.5. <i>Programovatelné automaty PLC.....</i>	<i>39</i>
2.4.6. <i>Osobní počítače PC.....</i>	<i>42</i>
2.4.7. <i>Svítlidla.....</i>	<i>43</i>
3. METODY VÝPOČTU PRO PREDIKCI POKLESŮ NAPĚTÍ.....	44
3.1. METODA MÍST ZKRATŮ	46
3.1.1. <i>Metoda pro výpočet zkratových poměrů v síti.....</i>	<i>47</i>
3.1.2. <i>Oblast ohrožení a postporuchová matice napětí.....</i>	<i>51</i>
3.1.3. <i>Umístění a množství míst zkratů</i>	<i>53</i>
3.2. METODA KRITICKÝCH VZDÁLENOSTÍ.....	53

4. STANOVENÍ KRITICKÝCH VZDÁLENOSTÍ NA MODELU SÍTĚ.....	58
4.1. VÝPOČTY NA HLADINĚ 110kV	59
4.2. VÝPOČTY NA HLADINĚ 22kV	61
4.3. STANOVENÍ POČTU POKLESŮ	66
ZÁVĚR	70
SEZNAM LITERATURY.....	71
PŘÍLOHA A.....	I
UCELENÉ ZADÁNÍ MODELU SÍTĚ.....	I
PŘÍLOHA B.....	IV
PORUCHOVOST VEDENÍ NA VVN	IV

Seznam symbolů a zkratek

C	Napěťový součinitel	
I	Proud	A
I_k	Poruchový proud	A
L	Vzdálenost	km
l_{krit}	Kritická vzdálenost	km
N	Počet uzlů sítě	
N_i	Počet odběratelů, kteří byli vystaveni poklesu napětí pod hodnotu X	
N_t	Počet odběratelů připojených k jednomu místu	
P_{lt}	Dlouhodobá míra vjemu flikru	
P_{st}	Krátkodobá míra vjemu flikru	
R	Četnost výskytu	
R	Elektrický odpor	Ω
S_k''	Zkratový výkon sítě	VA
S_{nt}	Jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru	VA
S_{PCC}	Zdánlivý výkon ve společném napájecím bodě	VA
S_{poruch}	Zdánlivý výkonu v místě poruchy	VA
TDH	Činitel celkového harmonického zkreslení	
U_0	Vektor uzlových napětí v bezporuchovém stavu	V
U_0, U_1, U_2	Netočivá, sousledná, zpětná složka napětí	V
U_{dfv}	Matice postporuchových napětí	V
u_h	Harmonické napětí	V
U_k	Předporuchové napětí	V
u_k	Napětí nakrátko	V
u_{krit}	Kritická hodnota napětí	V
U_m	Meziharmonické napětí	V
U_n	Jmenovité napětí	V
u_{PCC}	Napětí ve společném napájecím bodě	V
$U_{rms(1/2)}$	Efektivní hodnota napětí obnovená každou půlperiodou	V
X	Hranice efektivních hodnot	
X	Reaktance	Ω
Z	Impedance	Ω
Z_{bus}	Impedanční matice soustavy	Ω
ΔP_k	Ztráty nakrátko	W

Δt	Doba trvání poklesu	s
ΔU	Efektivní hodnota napětí	V
ΔU_f	Vektor uzlových napětí	V
λ	Poruchovost vedení	
ω_{nor}	Standardní otáčky	
ω_{pok}	Otáčky během poklesu napětí	
<i>AC</i>	Střídavé napětí	
<i>CPU</i>	Výpočetní jednotka	
<i>DC</i>	Stejnoseměrné napětí	
<i>HDO</i>	Hromadné dálkové ovládání	
<i>I/O</i>	Vstup/výstup	
<i>OZ</i>	Opětné zapínání	
<i>PC</i>	Osobní počítač	
<i>PCC</i>	Společný napájecí bod	
<i>PLC</i>	Programovatelný automat	
<i>PPDS</i>	Pravidla provozování distribučních soustav	
<i>PPL</i>	Fázový závěs	
<i>VN</i>	Vysoké napětí	
<i>VVN</i>	Velmi vysoké napětí	

Úvod

Hlavním tématem diplomové práce je problematika poklesů napětí. O tomto nežádoucím jevu, který označujeme jako problém související s kvalitou dodávky elektrické energie, se začalo diskutovat v období posledních několika let. Mnoho společností muselo začít řešit problémy způsobené právě v důsledku poklesů napětí. Jedná se o důsledek modernizace výrobních procesů, které jsou čím dál častěji řízeny elektronickými prvky, jež jsou právě na tento jev citlivé. Příkladem mohou být výrobní linky stáčírny Dobré vody, ve kterých poklesy napětí způsobovaly přerušení výrobního procesu, a bylo nutné po každém jednom přerušení povolat specialistu k opětovnému správnému nastavení výrobních linek. Tímto docházelo k přerušení výroby až na půl dne a důsledkem byly velké ekonomické ztráty ve výrobě. Problém poklesu napětí je mnohem závažnější než přímé přerušení dodávky elektrické energie. Přímé přerušení dodávky elektrické energie se projeví pouze na postižené větvi elektrické sítě, pokles napětí se však projeví nejenom na postižené větvi, nýbrž v závislosti na parametrech sítě i v jejím širším okolí.

Práce je rozdělena do čtyř kapitol, ve kterých je postupně rozebrána problematika kvality elektrické energie, poklesů napětí včetně jejich druhů, vlastností a vlivu na citlivá zařízení. Dále jsou popsány metody výpočtů poklesů napětí, pomocí kterých lze mj. určit počet vzniklých poklesů napětí za dané období, oblast ohrožení a případně i ekonomické ztráty v dané části sítě. Pomocí těchto výsledků jsou odběratelé postižovaní poklesy napětí schopni určit způsob ochrany proti tomuto jevu. Výpočty aplikované na modelovém příkladu sítě jsou součástí čtvrté kapitoly.

1. Kvalita elektrické energie

Na kvalitu elektrické energie lze hledět z několika stran. Je zřejmé, že se bude lišit pohled dodavatele, odběratele, ale také výrobců zařízení, pro které je elektrická energie podmínkou funkčnosti. Zhoršení kvality dodávané energie může ovlivnit správnou funkci zařízení, což může v některých případech vést až k přerušení výrobních procesů případně i k ohrožení lidských životů. Kvalita elektrické energie je v konečném důsledku záležitostí zákazníka (odběratele) a ten má v tomto případě přednost. Proto je možné kvalitu elektrické energie definovat jako *problém, úzce související s odchylkou napětí, proudu nebo frekvence od jmenovité hodnoty mající za následek chybnou činnost zařízení*.

V předepsané standardní kvalitě vyrobená elektrická energie se pomocí elektrizační soustavy, tzn. pomocí přenosových a distribučních sítí, dostává až ke konečnému spotřebiteli. V průběhu této cesty podléhá elektrická energie mnoha vnějším faktorům, které dle svého charakteru mohou mít i zásadní vliv na výslednou kvalitu dodávané elektrické energie. Mezi tyto faktory se řadí:

- Atmosférické jevy
- Vlivy způsobené užíváním některých elektrických spotřebičů (elektronické regulátory výkonu otáček, napájecí zdroje elektronických součástek)
- Vlivy způsobené provozní manipulací v síti
- Působení ochran a automatizačních prostředků sloužících k omezení poruchových stavů v síti
- Časté spínání velkých spotřebičů

Odběratel elektrické energie očekává, že bude dodávána v požadovaném místě, množství, čase a v neposlední řadě kvalitě. Ačkoliv mluvíme o kvalitě elektrické energie, ve skutečnosti se jedná ve většině případů o kvalitu napájecího napětí. Množství v tomto případě charakterizuje dodávanou elektrickou práci, která představuje proudové zatížení elektrizační soustavy v závislosti na místě připojení. Z tohoto hlediska je velmi obtížné kontrolovat kvalitu elektrické energie jakožto celku, jelikož je možné ovlivnit pouze kvalitu napěťové křivky, tzn. konstantní frekvenci a konstantní velikost. Kontrola ze sítě odebíraných proudů uživateli není možná. Proto normy zabývající se touto problematikou řeší pouze tvar a velikost napěťové křivky a její případné odchylky. [1],[3]

1.1. Parametry kvality dodávané elektrické energie

Určující parametry kvality elektrické energie jsou udávány provozními hodnotami popř. charakteristikami systémových veličin. Za tyto parametry ručí provozovatel sítě při normálním stavu elektrizační soustavy.

Kvalitativní ukazatele:

1. Kmitočet sítě
2. Velikost napájecího napětí
3. Odchyly napájecího napětí
4. Rychlé změny napětí
5. Nesymetrie napájecího napětí
6. Harmonické napětí
7. Meziharmonická napětí
8. Úrovně napětí signálů v napájecím napětí
9. Přerušování napájecího napětí
10. Poklesy napájecího napětí
11. Zvýšení napájecího napětí

Tyto kvalitativní parametry elektrické energie jsou uvedeny v normě ČSN EN 50 160. Hodnoty těchto parametrů jsou definovány pro společný napájecí bod (PCC), ke kterému jsou spotřebitelé připojeni. Napájecí bod je definován jako místo, ve kterém je možné připojení jednoho či více uživatelů. Nejčastěji se jedná o místo měření odběru elektrické energie odběratelem. [2]

1.2. Charakteristiky a příčiny ovlivňující kvalitu elektrické energie

Příčiny ovlivňující kvalitu elektrické energie lze rozdělit podle jejich povahy do dvou kategorií:

A. Průběžné jevy

Průběžný jev lze charakterizovat jako malou odchylku od jmenovitých hodnot vyskytujících se v průběhu času. Jedná se tedy o jev nepřetržitý, např. harmonické zkreslení, změna frekvence. Tyto jevy jsou ve většině případů zapříčiněny způsobem zatížení, změnami zatížení nebo nelineárním zatížením.

B. Napěťové události

Mezi napěťové události se řadí náhlé a závažné odchylky od normálního nebo požadovaného tvaru vlny. Příčinami typicky bývají neočekávané události (poruchy) nebo vnější vlivy (počasí, cizí zavinění). Jedná se například o poklesy nebo přerušení napětí.[2],[3]

1.2.1. Průběžné jevy

Kmitočet sítě

Jmenovitá hodnota kmitočtu napájecího napětí je 50 Hz. Dle normy ČSN EN 50 160 musí střední hodnota kmitočtu základní harmonické za normálních provozních podmínek, měřená v intervalu 10 s odpovídat mezím v tabulce č. 1.

Tab. č. 1 - Mezní hodnoty kmitočtu v síti

Systémy se synchronním připojením k propojenému systému	
50 Hz \pm 1 %	během 99,5 % roku
50 Hz + 4 % / - 6%	po 100 % času
Systémy bez synchronního připojení k propojenému systému (ostrovní napájecí systémy)	
50 Hz \pm 2 %	během 95 % roku
50 Hz \pm 15 %	po 100 % času

Zdroj: [2]

Poruchy síťového kmitočtu jsou nízkofrekvenční jevy, vedoucí k poklesům napětí nebo přepětím. Zdrojem těchto odchylek mohou být poruchy nebo manipulace (např. prepínací operace) v elektrizační soustavě.[2],[4]

Velikost a odchylky napájecího napětí

Norma ČSN IEC 38: *Normalizovaná řada napětí* určuje velikost napájecího napětí v elektrizační soustavě. Za normálních podmínek by hodnoty napětí měly odpovídat tabulce č.2.[5]

Tab. č. 2 - Velikost a odchylky napájecího napětí

Sít'	Dovolený rozsah
230 V	230V \pm 10 %
110 kV	110 kV \pm 10 %
220 kV	220 kV \pm 10 %
400 kV	400 kV \pm 5 %

Zdroj: [2]

Vzniklé odchylky od těchto hodnot jsou za normálních provozních podmínek způsobeny spínáním velkých zátěží, jako jsou například pohony s motory, obloukové pece, svařovací stroje, kompenzační kondenzátory. [2], [3]

Rychlé změny napětí

Efektivní hodnota rychlých změn napětí by za normálních podmínek neměla překročit hodnoty stanovené v tabulce č. 3, kde r je četnost výskytu a ΔU efektivní hodnota napětí. [5]

Tab. č. 3 - Mezní hodnoty rychlé změny napětí

Četnost [r/h]	ΔU_{\max} [% U_n]
$r \leq 1$	3
$1 < r \leq 10$	2,5
$10 < r \leq 100$	1,5
$100 < r \leq 1000$	1

Zdroj: [2]

Odchylky jsou většinou způsobeny změnami zatížení v zařízeních uživatelů nebo spínáním v síti.[2]

Flikr – jedná se nízkofrekvenční jev, ve kterém probíhá změna velikosti napětí nebo frekvence v míře rozpoznatelné lidským okem. Jedná se o subjektivní dojem v závislosti na citlivosti pozorovatele.[4]

Flikr hodnotíme pomocí míry vjemu flikru. Je stanoveno, že za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne krátkodobá míra vjemu flikru P_{st} a dlouhodobá míra vjemu flikru P_{It} v 95 % sledovaných intervalů v následujících mezích, $P_{st} \leq 0,8$ respektive $P_{It} \leq 0,6$. [5]

Nesymetrie napájecího napětí

Nesymetrii napájecího napětí lze definovat jako maximální odchylku od průměru tří fázových napětí nebo proudů vyjádřených v procentech. Při normálních provozních podmínkách musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0 % až 2 % sousledné složky. V některých oblastech je možné dosáhnout nesymetrie až do 3%. [1]

Hlavními zdroji nesymetrie o více jak 2% jsou jednofázové zařízení připojená k třífázové soustavě. Nesymetrii může také způsobit spálení pojistek na jedné z fází. [1]

Harmonické napětí

Harmonická napětí jsou sinusová napětí, která jsou celočíselným násobkem kmitočtu celé elektrizační soustavy. Jmenovitý kmitočet sítě je 50 Hz. Harmonické napětíové zkreslení vzniká v důsledku nelineárních charakteristik zátěží připojených do elektrizační soustavy. Jednotlivé úrovně harmonického zkreslení jsou popsány pomocí kompletního harmonického spektra. Zde je u každé jedné harmonické známa její velikost a fázový posun. Další možností je činitel celkového harmonického zkreslení THD, který je dán vztahem:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2}$$

kde: h je řád harmonické

[1],[2]

Za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot harmonických napětí u_h a celkového harmonického zkreslení THD v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu podle následující tabulky č. 4. [2]

Tab. č. 4 - Úrovně jednotlivých harmonických napětí v předávacím místě

Liché harmonické ne-násobky 3		Liché harmonické násobky 3		Sudé harmonické	
Řád harmonické h	Harmonické napětí v %	Řád harmonické h	Harmonické napětí v %	Řád harmonické h	Harmonické napětí v %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6 až 24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19,23,25	1,5				

Zdroj: [2]

Meziharmonická napětí

Meziharmonická napětí jsou sinusová napětí, jejichž frekvenční složky nejsou celými násobky kmitočtu elektrizační soustavy. Objevují se buď jako diskrétní kmitočty, nebo jako širokopásmové spektrum. Vyskytují se ve všech napěťových hladinách. Je stanoveno, že za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot meziharmonických napětí U_m menších než 0.2 % U_n . [2]

Hlavními zdroji meziharmonického zkreslení jsou statické převodníky frekvencí (měniče frekvence), cyklokonvertory a indukční pece. [3]

Úrovně napětí signálů v napájecím napětí

V veřejnou distribuční síť provozovatelé využívají také pro přenos informací (např. signál HDO). Signály vyslané distribuční sítí mohou zapříčinit rušení zařízení u odběratelů (např. telefonní linky). Proto musí být za normálních provozních podmínek během libovolného denního období 99 % průměrných efektivních hodnot meziharmonických napětí v měřicích intervalech 3s menších než 0,3 % U_n . [2]

1.2.2. Napět'ové jevy

Přerušování napájecího napětí

Jako přerušování napájecího napětí je označován jev, při kterém klesne hodnota napětí v odběrném místě pod 5 % jmenovitého napětí. Dle doby trvání se přerušování dělí do dvou

skupin, na krátkodobá a dlouhodobá. Jako problém ovlivňující kvalitu elektrické energie jsou označovány přerušeni krátkodobá.

Doba trvání krátkodobých přerušeni musí být menší než 3 minuty, nicméně až v 70 % případů je doba trvání kratší než 1 minuta. Přerušeni napájecího napětí bývá nejčastěji způsobeno poruchami v síti a následnou reakcí ochran.[2]

Poklesy napájecího napětí

Poklesy napájecího napětí lze dle doby jejich trvání rozdělit podobně jako přerušeni na dlouhodobé (podpětí) a krátkodobé.

Doba trvání dlouhodobých poklesů je delší než 1 minuta a napětí v tomto případě klesne pod nejmenší dovolenou hodnotu sítě. Příčinou těchto poklesů je spínání zátěží.[1]

Krátkodobé poklesy jsou poklesy v rozmezí 5 % až 90 % jmenovitého napětí. Doba jejich trvání je podmíněna zpětným nárůstem napětí na jmenovitou hodnotu a to do 10 ms až 1 s. Jsou způsobeny poruchami v síti i v instalaci odběratelů, rozběhy velkých motorů nebo přepínáním transformátorů.[2]

Zvýšení napájecího napětí

Zvýšení napětí lze opět dělit, jako dva předešlé případy, tedy dle doby trvání na krátkodobé (do 1 minuty) a dlouhodobé (nad 1 minutu).

Dlouhodobý nárůst napětí je označován jako přepětí. Jedná se o nárůst napětí nad 110% jmenovitého napětí sítě. Jsou způsobena odepínáním velkých zátěží nebo připínáním kompenzačních kondenzátorů.

U krátkodobých nárůstů napájecího napětí je doba trvání tohoto jevu maximálně jedna minuta a stejně jako u dlouhodobých se jedná o nárůst napětí nad 110% jmenovité hodnoty. Jsou způsobena odepínáním velkých odběrů nebo poruchami v síti.[1]

2. Poklesy napětí

Jak již bylo v předchozí části práce zmíněno, poklesy napětí úzce souvisejí s kvalitou elektrické energie. Ve většině případů se jedná o důsledek poruch v elektrizační soustavě a následných reakcí ochran a automatik, spínáním velkých odběrů nebo transformátorů.

Následky poklesů napětí se dotýkají všech odběratelů, ať už se jedná o domácnosti, podnikatele nebo velké průmyslové závody. Ve všech těchto sektorech existuje celá řada zařízení citlivých právě na poklesy napětí. Jako příklad lze uvést počítače a jiné elektronicky ovládané prvky, u kterých v důsledku poklesu napětí může docházet k nepříjemné ztrátě dat. Stejně tak pro průmyslové závody, které využívají automatizovaných zařízení, může pokles napětí znamenat velké ekonomické ztráty.[1]

2.1.Charakteristika poklesu napětí

Krátkodobý pokles napětí je podle normy ČSN EN 50 160 definován jako pokles napájecího napětí, po kterém následuje obnovení napětí v krátkém časovém úseku. Konvenční doba trvání krátkodobého poklesu je v rozmezí 10 ms až 1 minuty. Hloubka krátkodobého poklesu napětí se pohybuje od 90 % až do 5 % jmenovitého napětí.[6]

Tato definice je rozdílná od definice podle ČSN IEC 50(161) čl. 161-O8-10, kde je krátkodobý pokles napětí definován jako náhlý pokles napětí v libovolném bodě elektrické soustavy a následující obnovení napětí během krátkého časového úseku trvajících několik cyklů až několik sekund.[6]

V případě jednofázového systému krátkodobý pokles napětí začíná okamžikem, kdy efektivní hodnota napětí obnovená každou půlperiodou ($U_{\text{rms}(1/2)}$) klesne pod prahovou hodnotu krátkodobého poklesu napětí a je ukončen, když napětí $U_{\text{rms}(1/2)}$ dosáhne nebo je větší než prahová hodnota krátkodobého poklesu napětí plus hystereze.[7]

U vícefázových systémů krátkodobý pokles napětí vzniká, když napětí $U_{\text{rms}(1/2)}$ na jedné nebo více fázích klesne pod prahovou hodnotu krátkodobého poklesu napětí a končí, když se napětí $U_{\text{rms}(1/2)}$ na všech měřicích fázích rovná nebo přesahuje prahovou hodnotu plus hysterezi.[7]

Základní parametry poklesu napětí:

- Hloubka poklesu ΔU

Hloubka poklesu napětí je definována jako rozdíl mezi napětím během poklesu napětí a jmenovitým napětím sítě. Hloubka je vyjádřena pomocí procent jmenovitého napětí.

- Trvání poklesu Δt

Jako trvání poklesu napětí Δt je označován časový úsek, během kterého je napětí menší než 90% jmenovité hodnoty. Pokles s dobou trvání pod 10 ms je považován za přechodný jev.

Další veličiny charakterizující poklesy napětí:

- Velikost napětí během poklesu napětí
- Hodnota poklesu napětí – hloubka poklesu integrovaná po dobu trvání poklesu
- Sousedná U_1 , zpětná U_2 a netočivá U_0 složka napětí při poklesu napětí – možnost zachycení nejen velikosti napětí při poklesu, ale také změny vzájemného natočení všech tří fázorů napětí.[8]

2.2.Vznik poklesu napětí

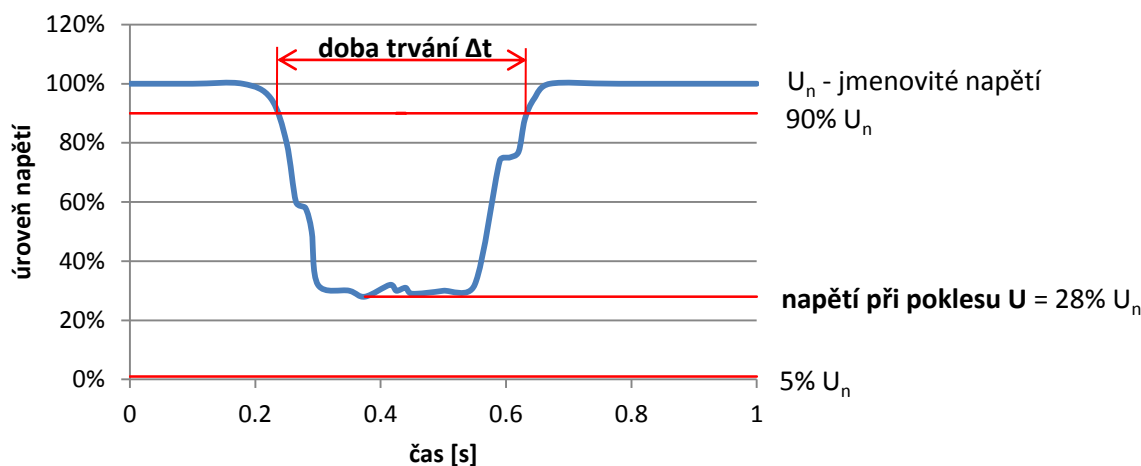
Pokles napětí je většinou způsoben poruchami v síti a následnou reakcí ochrany, spínáním velkých zátěží nebo transformátorů. Tyto příčiny lze ve většině případů od sebe identifikovat podle charakteru poklesu napětí. Poklesy napětí způsobené poruchou v síti jsou oproti poklesům v důsledku spínání zátěží kratšího charakteru s výraznější hloubkou poklesu napětí.[9]

2.2.1. Poklesy v důsledku poruch v síti

Napájecí síť je velmi složitá. Míra poklesu napětí způsobená poruchou se může v různých částech sítě velmi lišit. Závisí na vzdálenosti od místa poruchy, topologii sítě a vzájemné impedanci poruchy, zátěže a generátorech v jejich společném napájecím bodě (PCC).[9]

Doba trvání poklesu napětí se v tomto případě odvíjí od doby potřebné k reakci ochranných zařízení, obvykle se jedná řádově o stovky milisekund. Vzhledem k tomu, že porucha může být často pouze přechodná, např. způsobená padající větví stromu na vedení, může být závada od chvíle její vzniku velmi rychle vyřešena. V případě trvalého odpojení okruhu elektrickou ochranou, jsou všichni uživatelé připojení k tomuto okruhu bez dodávky elektrické energie do doby, než je vedení zkontrolováno a znovu připojeno.[9]

Graf č. 1 - Pokles napětí způsobený poruchou v síti

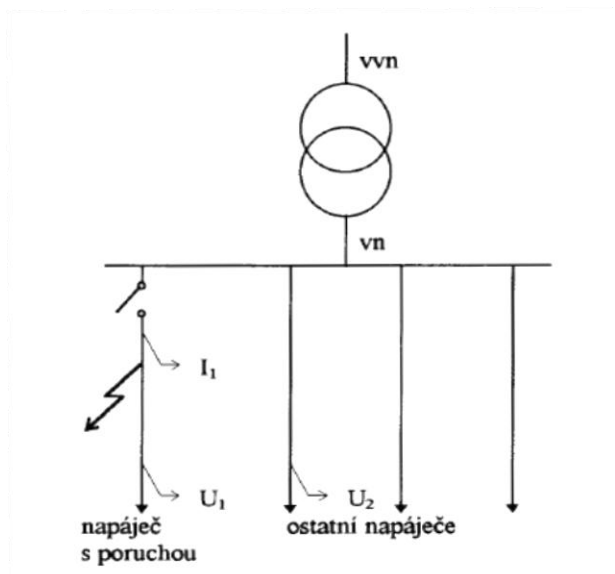


Zdroj: vlastní zpracování

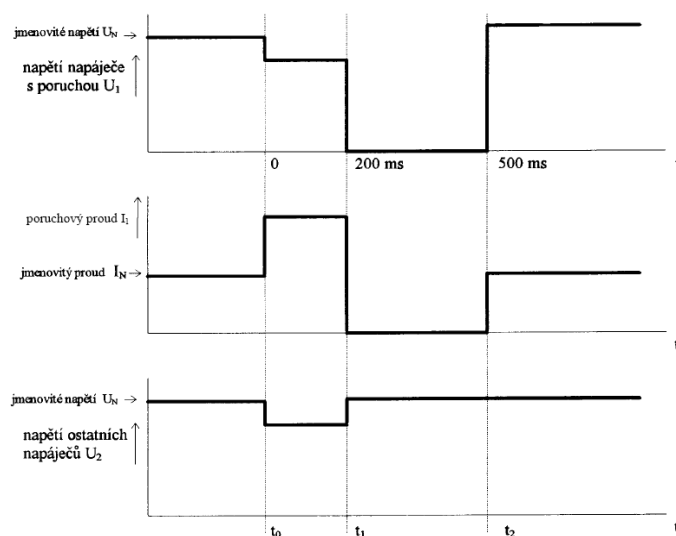
Automatika opětovného zapínání OZ může pomoci zmírnit nastalou situaci, ale také způsobit nárůst počtu poklesů. Automatika opětovného zapínání OZ se pokusí znovu připojit obvod rozpojený následkem reakcí ochran a to obvykle do 1 sekundy. Pokud je závada vyřešena dojde k obnovení napájení. V případě, že porucha přetrvává, bude se proces opakovat, dojde k reakci ochran a následnému pokusu o obnovení dodávky. Počet opakování je dán nastavením automatiky OZ. Po každém neúspěšném pokusu o obnovení dodávky dochází k dalším poklesům.[9]

Příklad funkce opětovného zapínání OZ

Vzniklá porucha na napájecím vedení číslo 1 má za následek u odběratele připojeného na toto vedení krátkodobé přerušení napětí (doba trvání se pohybuje řádově v desetinách sekundy). U odběratele připojeného na jiné vedení (např. vedení číslo 2) způsobí přerušení napětí pokles napětí. Stejně poklesne napětí na vysokonapěťových sběrnicích v rozvodně.[7]

Obrázek 1 - Příklad funkce OZ v distribuční soustavě vysokého napětí

Převzaty z: [7]

Obrázek 2 - Průběhy napětí a proudu při funkci OZ

Šíření poklesů v síti a jejich možná změna

V případě poruchy na určitém místě v síti, mají tímto způsobem vzniklé poklesy napětí na různých místech sítě různé vlastnosti. Obecně lze říci, že s rostoucí vzdáleností od poruchy klesá závažnost poklesu napětí. Závažnost je myšlena tak, že hloubka poklesu napětí je ve všech postižených fázích menší a odpovídající změna úhlů mezi fázemi je méně výrazná. Největší změny v charakteru poklesu napětí jsou způsobeny přechodem na jinou napěťovou úroveň. Vlastnosti transformátorů v elektrizační soustavě (např. způsob jejich uzemnění a připojení vinutí) mají významný dopad na změny velikosti napětí a jejich fázových úhlů.[10]

Různé zapojení vinutí transformátoru a uzemnění mění velikost napětí a fázový úhel jak u sdruženého tak u fázového napětí. V této souvislosti rozlišujeme tři základní druhy transformátorů:

- Transformátory, které nemají žádný vliv na napětí. Jedná se o transformátory zapojené do Yy a na obou stranách uzemněné.
- Transformátory, které částečně nebo úplně odstraňují nulovou složku napětí. Nulové složky napětí jsou zcela odstraněny transformátorem zapojeným do Dd nebo transformátorem Yy bez uzemnění. Trojvinutové Yyd transformátory odstraňují pouze část nulové složky napětí.

- Transformátory, které změny sdružené napětí na napětí fázové a dále odstraní nulovou složku napětí. Nejlepším příkladem je Dy transformátor.[10]

Níže uvedená tabulka č. 5 představuje změny velikosti napětí a fázových úhlů při poklesu napětí po průchodu jedním a dvěma transformátory Dy. Zelená šipka znázorňuje původní hodnotu před poruchou, červená šipka představuje pokles napětí v důsledku poruchy v síti.[10]

Tab. č. 5 - Změny velikostí napětí a fázových úhlů způsobené transformátorem Dy

Typ poruchy	Napětí v místě poruchy	Napětí za jedním Dy transformátorem	Napětí za dvěma Dy transformátory
Na třech fázích			
Na jedné fázi v účinně uzemněné síti			
Na dvou fázích			

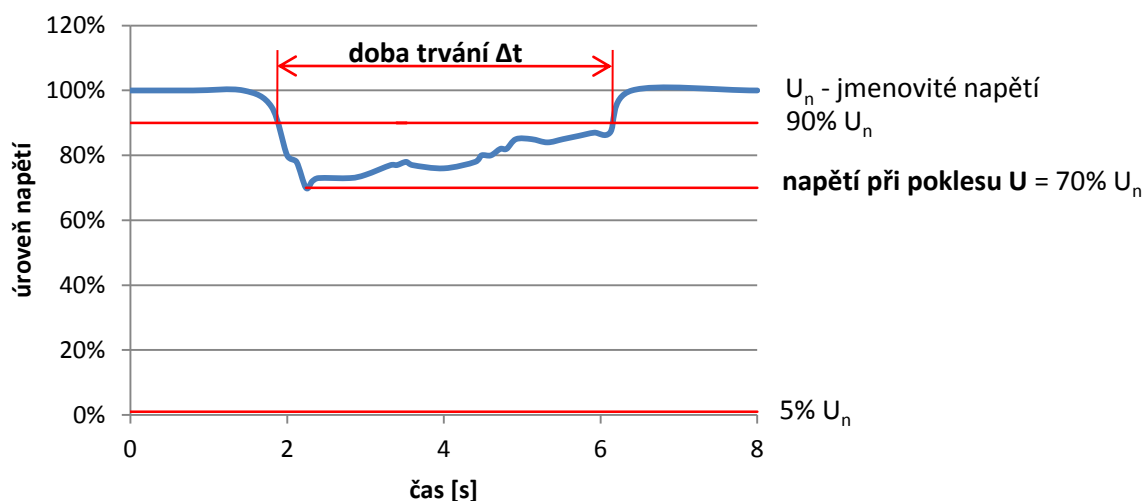
Zdroj: [10]

2.2.2. Poklesy v důsledku spínání velkých zátěží

Při spouštění velkých pohonů s velkým zatížením, může počáteční proud dosáhnout až několikanásobně větších hodnot než proud provozní. Vzhledem k tomu, že zdroje napětí a následná kabeláž je dimenzována pro normální provozní podmínky, tak vyšší počáteční proud způsobí jak v rozvodné síti, tak na zařízeních pokles napětí. Velikosti tohoto jevu je závislá na

tom, jak “tvrdá“ je síť. To znamená, jakých nízkých hodnot dosahuje impedance ve společném napájecím bodě (PCC) a na hodnotě impedance instalované kabeláže. Poklesy způsobené rozběhovými proudy se vyznačují menší hloubkou poklesu a delší dobou trvání – obvykle jednotky až desítky sekund.[9]

Graf č. 2 - Pokles napětí způsobený sepnutím zátěže



Zdroj: vlastní zpracování

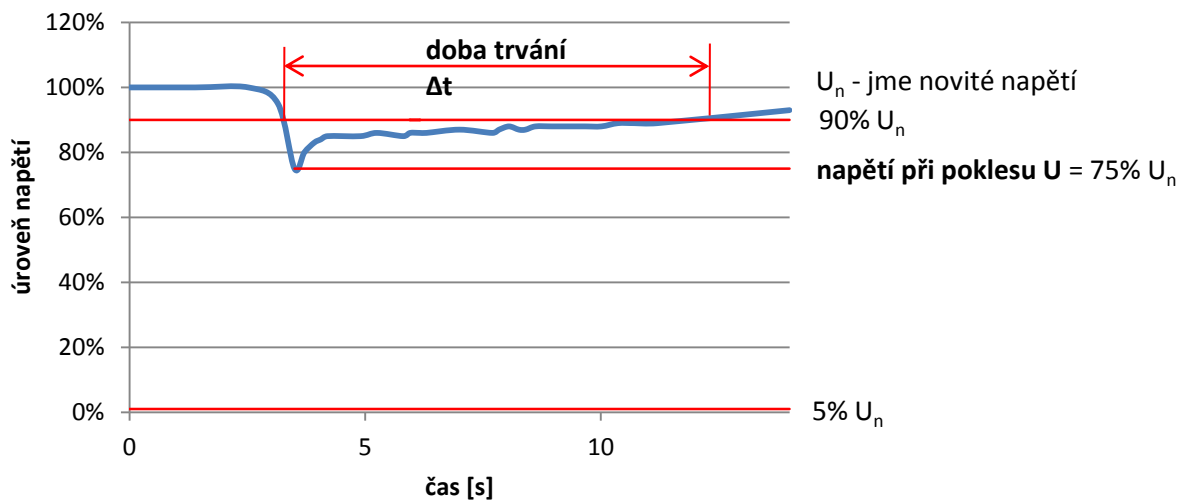
Místní problémy způsobené příliš vysokou hodnotou odporu v kabeláži jsou snadno řešitelné. Velké zátěže by měli být zpět přímo připojeny k odpovídající napěťové hladině – buď pomocí společného napájecího bodu, nebo na sekundární vinutí napájecího transformátoru. Pokud je problém způsobený impedancí společného napájecího bodu (PCC) tzn., že zdroj napájecího napětí je příliš “měkký“, jsou nutná další opatření. Jedním z řešení je, je-li to možné, k danému zařízení připojit softstartér, který omezí spouštěcí proud na nižší hodnotu. Pokud není možné korigovat poklesy napětí, je potřeba dalších zařízení k jejich vyrovnání.[9]

2.2.3. Poklesy způsobené rozběhy transformátorů a nabíjením kapacit

Poklesy způsobené rozběhy transformátorů se velmi často objevují o několik sekund až minut později jako důsledek poklesů napětí způsobených poruchou v síti. Přesněji, jedná se o následek úspěšného obnovení napájení pomocí automatiky OZ. Dodání energie do napájecích kabelů vede k saturaci všech distribuční transformátorů, což způsobuje velký spínací proud a tedy i krátkodobý pokles napětí. Nicméně, v závislosti na hloubce poklesu, době trvání, na místě v časovém průběhu napětí, ve kterém pokles začíná a končí, impedanci zdroje, poloze

transformátoru a jeho zbývajícím magnetickém toku, může být doba obnovení napětí prodloužena. Poklesy se vyznačují menší hloubkou poklesu a delší dobou trvání (graf č. 3.).

Graf č. 3 - Pokles napětí způsobený sepnutím transformátoru



Zdroj: vlastní zpracování

Nabíjení kondenzátorů může mít také za následek krátkodobé snížení napětí. Ačkoliv není tato změna považována za pokles napětí (kvůli krátké době trvání) může být efekt na některá zařízení stejný jako při poklesu napětí. Proto je tuto možnost třeba zvážit při návrhu a využití koncových zařízení.

2.3. Vyhodnocování napěťových událostí z hlediska poklesů napětí

Při vyhodnocování napěťových událostí z hlediska poklesů napětí se vychází ze dvou základních parametrů poklesů napětí a těmi jsou doba trvání a hloubka poklesu napětí. Výsledné ukazatele pro odběrná místa nebo síť umožňují získat přehledné informace o závažnosti poklesu napětí a jejich četnosti. Tyto ukazatele lze rozdělit do dvou skupin:

- V první skupině je uváděn počet jevů dané velikosti a doby trvání v určitém období (např. rok). Výsledky jsou znázorněny pomocí tabulek, histogramů nebo diagramů.
- Druhou skupinu tvoří jeden nebo menší soubor ukazatelů. Příkladem může být ukazatel SAFRI popisující kvalitu napětí celé sítě pomocí jediné hodnoty.

Tabulka UNIPEDA

K zaznamenávání a vyhodnocování poklesů napětí lze využít tabulky. Tabulka UNIPEDA (Unintentional Union of Producers and Distributors of Electrical Energy) je složena z buněk definovaných pro určitou hloubku poklesu napětí a délku trvání. V každé buňce je zaznamenán počet napěťových událostí za sledované období. Nejčastěji se jedná o jeden rok.[11]

Tab. č. 6 - Tabulka UNIPEDA

% U_n	$10 \leq t < 200$	$200 \leq t < 500$	$0,5 \leq t < 1$	$1 \leq t < 5$	$5 \leq t < 60$
	[ms]	[ms]	[s]	[s]	[s]
$90 > u \geq 80$					
$80 > u \geq 70$					
$70 > u \geq 40$					
$40 > u \geq 5$					
$5 > u \geq 0$					

Zdroj: [2]

V tabulce se shromažďují výsledky ze všech míst zahrnutých do měření. Každá buňka tedy může obsahovat:

- percentil (obvykle 95%) z celkového počtu zaznamenaných událostí ze všech míst
- maximální počet záznamů v buňce
- průměrná hodnota v dané buňce ze všech míst
- další statistické údaje

Jsou-li výsledky měření z různých typů sítí, je vhodné vytvořit oddělené tabulky pro jednotlivé typy vedení.[11]

V České republice je využívána tabulka dle *Pravidel provozování distribučních soustav* z listopadu 2011.

Tab. č. 7 - tabulka pro zpracování poklesá napětí dle PPDS

% U_n	$10 \leq t < 100$	$100 \leq t < 200$	$200 \leq t < 500$	$0,5 \leq t < 1$	$1 \leq t < 3$	$3 \leq t < 5$	$5 \leq t < 60$	$60 \leq t < 180$
	[ms]	[ms]	[ms]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]
$90 > u \geq 85$								
$85 > u \geq 80$								
$80 > u \geq 70$								
$70 > u \geq 40$								
$40 > u \geq 5$								
$5 > u \geq 0$								

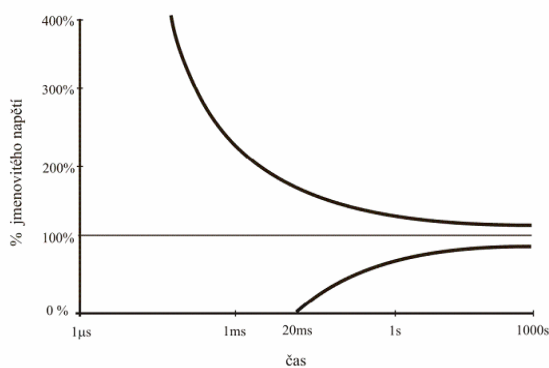
Zdroj: [5].

Křivky odolnosti spotřebičů

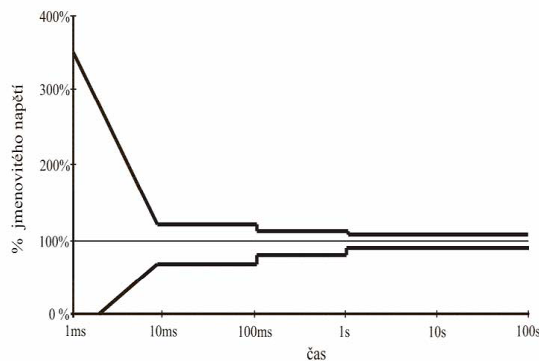
V důsledku větší snahy o definování odolnosti spotřebičů vůči napěťovým událostem (poklesům napětí) vznikla tzv. CBEMA křivka (obrázek 3), která byla postupně upravována do podoby ITIC křivky a následně normalizována organizací ANSI jako křivka IEEE 446 (obrázek 4).[11]

Pomocí mezní křivky je vymezena oblast, ve které je zařízení při změně napájecího napětí schopno nadále plnit svoji funkci bez toho, aby došlo k selhání přístroje. Trvání poklesu napětí je vztaženo k procentuální hodnotě napětí sítě a křivka udává oblast, ve které je dané zařízení schopno nadále vykonávat svoji činnost bez přerušení nebo ztráty dat.[11]

Obrázek 3 - CBEMA křivka



Obrázek 4 - IEEE 446 křivka CBEMA křivka



Převzaty z: [13].

SAFRI index

SAFRI index (System RMS Variation Frequency Index) představuje průměrný počet poklesů napětí, zvýšení napětí a přerušení. Výsledné hodnoty mohou popisovat místo měření, odběrné místo, vývod, stanici nebo celou síť. Ukazatele SAFRI se dělí na dvě skupiny:

SAFRI-X – představuje počet poklesů pod danou úroveň napětí. Např. SAFRI-90 udává počet poklesů napětí pod úroveň 90% U_n .

$$SAFRI_X = \frac{\sum N_i}{N_t}$$

Kde: X – hranice efektivních hodnot

N_i – počet odběratelů, kteří byli vystaveni poklesu napětí pod hodnotu X

N_t – počet odběratelů připojených k jednomu místu

SAFRI-Curve – představuje výskyty napěťových událostí pod křivkou odolnosti daného zařízení. Např. $SAFRI_{CBEMA}$ koresponduje napěťovým událostem pod spodní hranicí CBEMA křivky.[3]

2.4. Zařízení citlivá na poklesy napětí

Zařízení koncových uživatelů mohou mít různou citlivost na poklesy napětí. Tato citlivost se odvíjí od konkrétního typu zátěže, nastavení ovládacích prvků a dalších požadavků. Z těchto důvodů je často velmi obtížné určit, které vlastnosti napěťových poklesů způsobují nesprávnou funkci zařízení. Nejčastěji se však jedná o délku trvání a hloubku poklesu napětí. Obecně platí, že zařízení citlivá na poklesy napájecího napětí lze rozdělit do tří skupin:

1) Zařízení citlivá pouze na hloubku poklesu napětí

Tato kategorie zahrnuje zařízení, jako jsou například podpěťová relé, zařízení ke kontrole procesů a motorů a mnoho dalších automatizovaných strojů (např. polovodičová výrobní zařízení). Přístroje v této skupině jsou citlivé na minimální hodnotu napětí v průběhu napěťového poklesu. Doba trvání je pro tyto zařízení až druhořadá.

2) Zařízení citlivá na době trvání i hloubce poklesu napětí

Tato skupina zahrnuje v podstatě veškeré vybavení obsahující elektronické napájecí zdroje. Takovéto zařízení přestává být funkční v případě poklesu napájecího napětí pod předepsané hodnoty. To znamená, že důležitou charakteristikou pro tento typ zařízení je délka trvání, po kterou je efektivní hodnota napětí pod zadaným prahem.

3) Zařízení citlivé na vlastnosti jiné než doba trvání a hloubka poklesu napětí

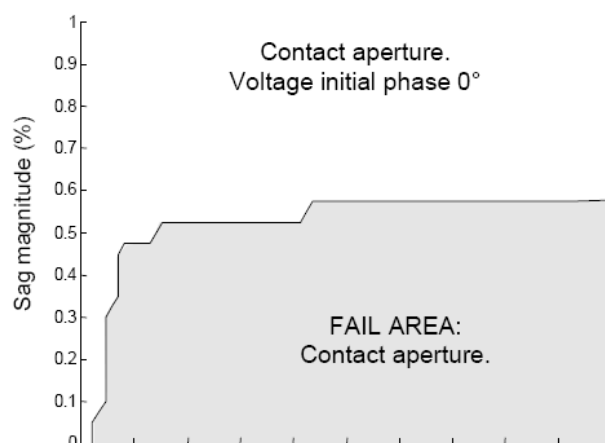
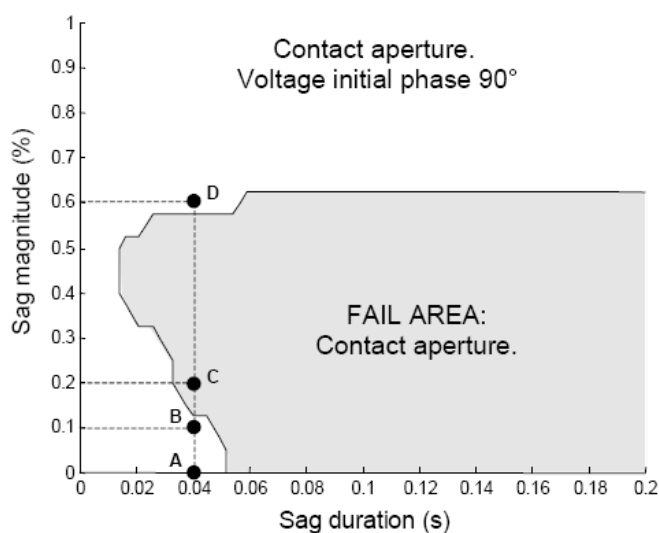
Některá zařízení jsou ovlivněna jinými parametry poklesů napětí, jako je například nesymetrie, okamžik časového průběhu, ve kterém začal pokles napětí, nebo jakékoliv přechodné oscilace vyskytující se během poruchy. Tyto vlastnosti jsou mnohem komplikovanější, než je doba trvání a hloubka poklesu a je velmi obtížné jejich dopady na daná zařízení zobecnit.[1]

2.4.1. Stykače

Elektromechanická relé a stykače jsou využívány k napájení a ovládání zátěže. Po přerušení napájení má stykač za úkol chránit např. motor před nekontrolovatelným restartem. V případě poklesu napětí mohou stykače odpojit zátěž nechtěně, což vede k přerušení výroby nebo nebezpečným situacím. Proto by bezpečnostní funkce stykačů a relé měly brát toto na vědomí i za cenu snížení odolnosti vůči napět'ovým poklesům.

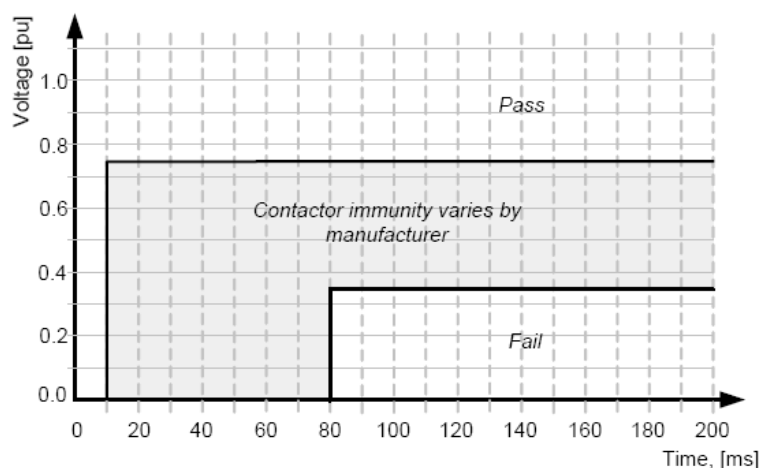
I když mohou spínat jak jednofázová tak třífázová zařízení, stykače jsou sami o sobě většinou zapojeny jako zařízení jednofázová. Obecně jsou stykače označovány jako slabé články v mnoha procesech při poklesech napětí.

V následujících obrázcích č. 5 a 6 jsou typické křivky odolnosti stykačů získané laboratorním měřením. Kromě hloubky poklesu napětí a doby trvání poklesu ovlivňuje reakci stykače také místo časového průběhu napětí, ve kterém byl pokles zahájen, což je na uvedených obrázcích jasně patrné. Stykače jsou nejvíce citlivé na poklesy zahájené při 90° a nejméně při zahájení poklesu na 0° , kde 0° odpovídá stoupající vlnové křivce, která právě protíná nulovou hodnotu.[10], [13]

Obrázek 5 - Toleranční křivka stykače při zahájení poklesu napětí v 0° časového průběhu**Obrázek 6 – Toleranční křivka stykače při zahájení poklesu napětí v 90° časového průběhu**

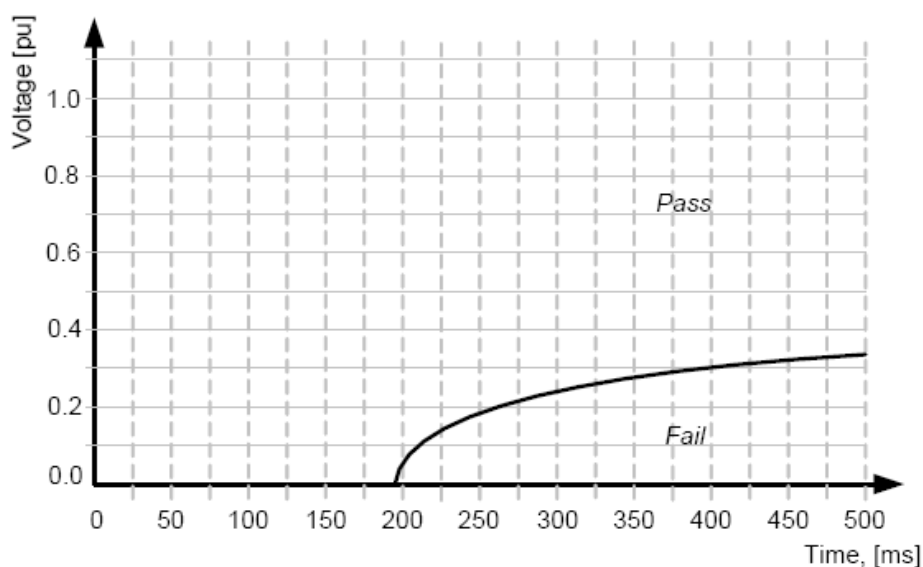
Převzaty z: [10]

Následující obrázek č. 7 představuje napět'ové toleranční křivky stykačů od různých výrobců z různých průzkumů, při kterých uvažujeme pouze hloubku poklesu a dobu trvání. Skutečné průběhy jsou aproximovány do pravoúhlých tvarů. Zobrazeny jsou pouze dvě maximální hraniční křivky pro vytýčení oblasti bez poruchy a s poruchou. Chování stykačů mezi těmito křivkami závisí na konkrétním výrobcí.[10],[13]

Obrázek 7 – Horní a spodní hranice tolerančních křivek pro střídavý stykač od různých výrobců

Převzato z: [10]

Citlivost na poklesy napětí lze u stykačů snížit, pokud jako ovládací napětí použijeme napětí stejnosměrné namísto střídavého. Toho docílíme pomocí usměrňovače a vyhlazovacího kondenzátoru. Tento kondenzátor je schopen v sobě uschovávat energii, která je v případě poklesu napětí použita k zmírnění jeho efektu. Výsledná citlivostní křivka je zobrazena na obrázku č. 8. Ve srovnání se stykači ovládanými střídavým napětím můžeme zanedbat bod časového průběhu, ve kterém byl pokles zahájen.[10]

Obrázek 8 - Toleranční křivka pro stejnosměrný stykač

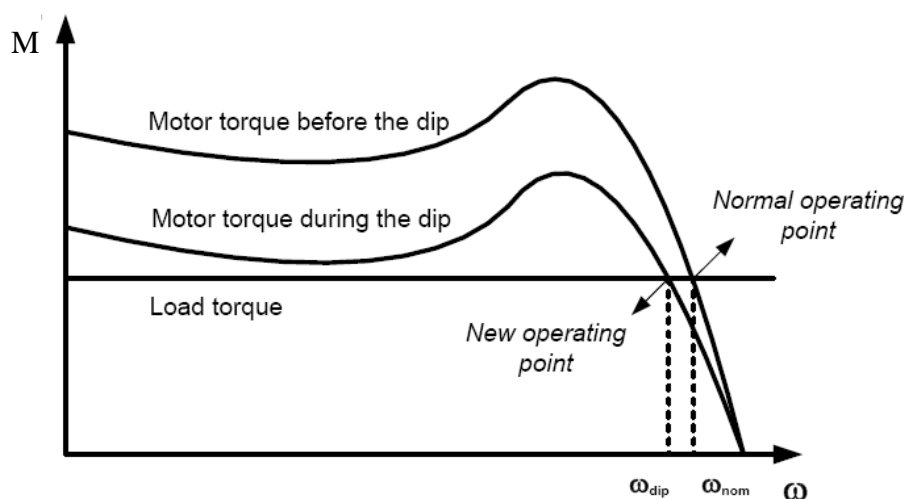
Převzato z: [10]

2.4.2. Přímě připojeně asynchronní motory

Nejčastěji se v průmyslu využívá přímě připojených asynchronních motorů a to v aplikacích, kde je zapotřebí konstantních otáček. Pokles napětí na jejich svorkách vede ke snížení rychlosti, kolísání proudu a momentu asynchronního motoru, dále k možné reakci ochranných prvků, jakými jsou například pojistky a jističe, popřípadě speciálních ochranných prvků motoru.

Začátek poklesu napětí způsobí pokles otáček motoru, protože platí, že vyvinutý točivý moment je úměrný druhé mocnině napájecího napětí. Na obrázku č. 9 je vidět maximální točivý moment motoru před a během poklesu napětí. Horizontální křivka znázorňuje hodnotu, která je potřebná pro konstantní běh motoru v daných aplikacích. Průniky obou křivek točivého momentu před a během poklesu se zatěžovací křivkou označujeme jako stabilní provozní body. Během poklesu napětí klesají otáčky z hodnoty ω_{nor} na hodnotu ω_{pok} . Čas potřebný k dosažení tohoto nového ustáleného stavu, závisí na systémové setrvačnosti a daném mechanickém zatížení, což je vyobrazeno na obrázku č. 10. Čím vyšší setrvačnost a nižší mechanické zatížení, tím pomalejší je ztráta otáček. Proud motoru vykazuje přechodný jev, zvyšuje se stejnou rychlostí, jako klesají otáčky. Pokud zatěžovací moment překročí maximální krouticí moment motoru při sníženém napětí, motor se zastaví. [10]

Obrázek 9 – Točivý moment pro přímě připojeně asynchronní motory za normálního stavu a během poklesu napětí

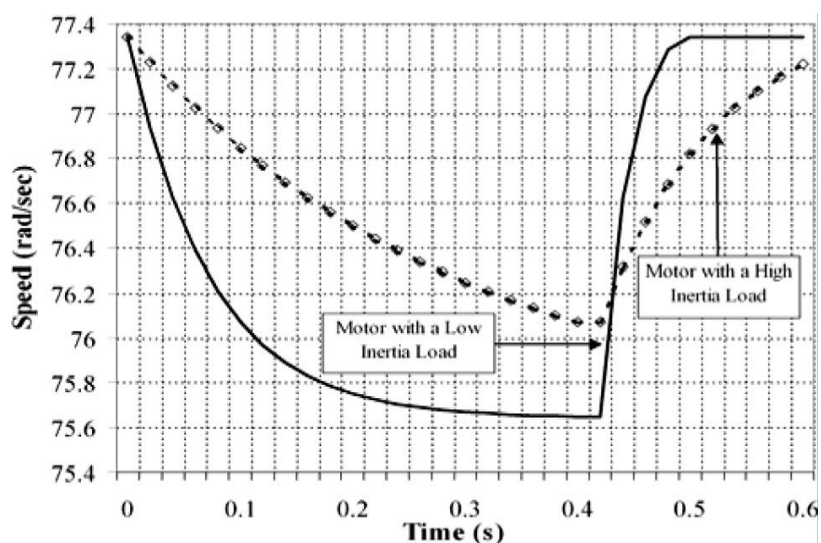


Převzato z: [10].

Po obnovení napětí motor obnovuje původní otáčky, což může způsobit odběr vyšších než rozběhových proudů. Pokud se jedná o velký motor, nebo větší množství přímě

připojených asynchronních motorů, bude docházet k dalšímu poklesu napětí. Proto se snižuje dostupný točivý moment a zvyšuje doba obnovení otáček. To může namáhat napájecí systém a vést k následné reakci ochranných prvků v soustavě, nebo špatné identifikaci problému ochrannými prvky motoru, které mohou způsobit jeho odpojení. V závislosti na hloubce poklesu, délce trvání poklesu, impedanci sítě a podmínkách zátěže motor může, ale nemusí dosáhnout původních otáček jako před poklesem napětí. Pokud jsou tyto hodnoty známi, lze definovat, zda je opravdu možné původní rychlost obnovit. [10]

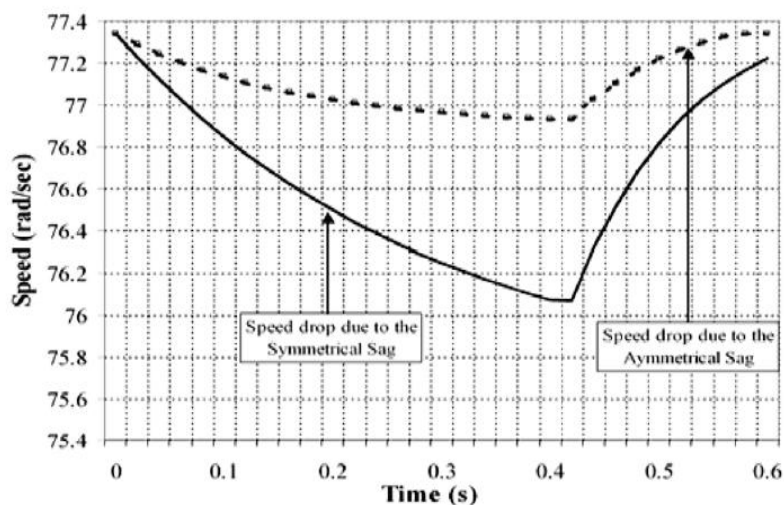
Obrázek 10 – Změna rychlosti při poklesu napětí přímo připojeného asynchronního motoru s ohledem na nízkou a vysokou setrvačnost zátěže.



Převzato z: [10].

V případě nesymetrického poklesu napětí na třech fázích může také docházet ke ztrátě rychlosti, kolísání proudu a momentu. Maximální hodnoty proudu a momentu závisí na místě počátku poklesu napětí v jeho časovém průběhu. Točivý moment je v tomto případě oscilační, na rozdíl od symetrického poklesu. Snížení rychlosti otáček je méně výrazné právě u nesymetrického poklesu (obrázek č. 11). [10]

Obrázek 11 - Změna rychlosti otáček při poklesu napětí přímo připojeného asynchronního motoru s ohledem na symetrický a nesymetrický pokles napětí



Převzato z: [10].

2.4.3. Řízené pohony

Řízené pohony jsou používány ke zlepšení řízení procesů, úspore energie, nebo k zabránění přílišného mechanického namáhání v zařízeních. S jejich pomocí lze řídit moment, nebo rychlost asynchronních i synchronních motorů. Napájecí napětí s fixní frekvencí je transformováno na variabilní frekvenci a napětí a dále přiváděno na svorky motoru. K transformaci se využívají elektronické měniče nejčastěji složené z diodového usměrňovače, sběrnice s kondenzátory a IGBT měniče. Usměrňovač nabíjí kondenzátory na sběrnici, které vyhlazují výsledné napětí, ale také působí jako pomocný vyrovnávací prvek při poklesech napětí. Pomocí pulsně šířkové modulace se mění hodnota napětí na požadovanou pro napájení motoru. Od 1,5kW jsou motory obvykle připojeny třífázově.

Účinek poklesu napětí na řízené pohony závisí na vnitřní topologii, řídicím algoritmu a typu zátěže. Rozdílné účinky také způsobuje symetrický a nesymetrický pokles napětí.[10]

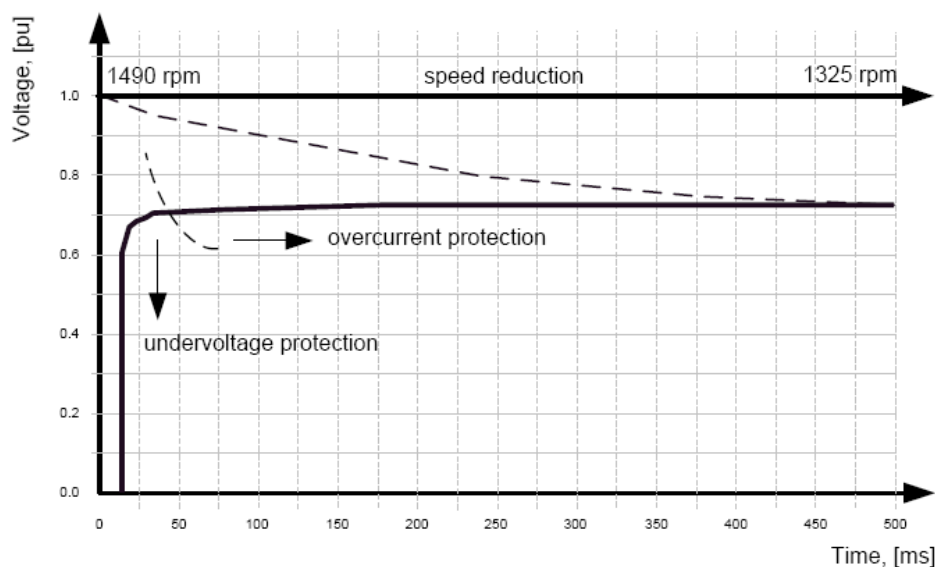
Symetrický pokles napětí na třífázově připojených řízených pohonech

Na obrázku č. 12 je napěťová toleranční křivka a křivka regulace rychlosti (přerušovaná čára) pomocí změny napětí a frekvence. Při vzniku poklesu napětí se kondenzátory na sběrnici začnou vybíjet do doby, než velikost napájecího napětí klesne pod napětí na sběrnici. Míra změny napětí na sběrnici záleží na typu zátěže regulovaného motoru. Pokud hodnota napětí na sběrnici klesne pod hodnotu nastavenou pro podpěťové ochrany, dojde k odstavení pohonu.

Podpěťová ochrana je aktivována v případě přerušení nebo poklesu napětí. Hodnota minimálního napětí, při kterém dojde k reakci, se pohybuje mezi 85-60% jmenovitého napájecího napětí, v závislosti na vnitřním uspořádání a systémovém nastavení.

V případě poklesu napětí s menší hloubkou a delší dobou trvání, může zareagovat nadproudová ochrana. U řízených pohonů s jednoduchou napěťově frekvenční regulací nejsou poklesy kompenzovány a dochází ke snížení napětí na svorkách motoru a následnému snížení momentu motoru. Pokud jsou řízené pohony používány na otevřené smyčce, není možné rychlost motoru zkorigovat. Po skončení poklesu napětí se kondenzátory začnou opět nabíjet, což způsobí velký proudový odběr. Tento vysoký nabíjecí proud může aktivovat proudovou ochranu, nebo poškodit usměrňovač. Na straně motoru to způsobuje vysoký proud v motoru, podobně jako je tomu u přímo připojených motorů po poklesu napětí. Vysoký proud v motoru může aktivovat nadproudovou ochranu v řídicí jednotce. [10], [14]

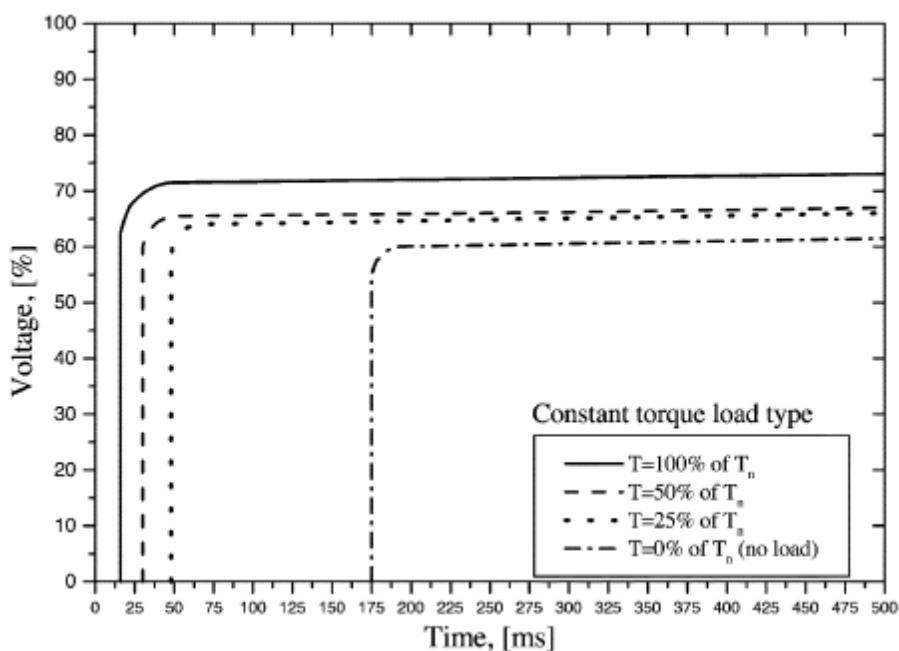
Obrázek 12 - Napěťová toleranční křivka a křivka regulace rychlosti (přerušovaná čára) pomocí změny napětí a frekvence.



Převzato z: [10].

Z obrázku č. 13 je patrné, jak velký vliv na odolnost řízených pohonů má mechanické zatížení motoru. Obecně lze říci, že s nižší zátěží roste odolnost vůči poklesům. Proto napětí na sběrnici klesá pomaleji a prodlužuje se doba reakce podpěťové ochrany. [10]

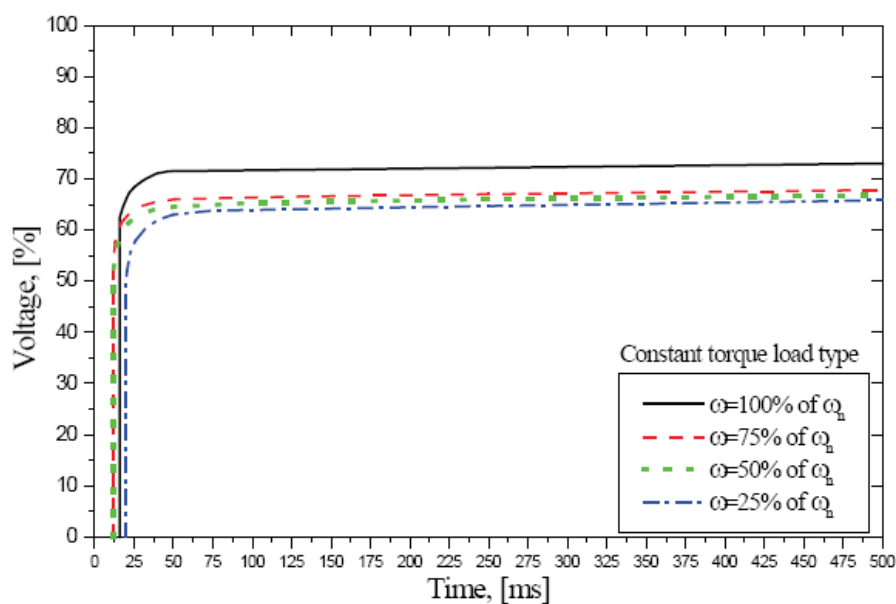
Obrázek 13 - Dopad rozdílného zatížení na řízené pohony z hlediska odolnosti proti poklesům napětí



Převzato z: [14].

Z obrázku č. 14 je také patrné, že dalším parametrem ovlivňující odolnost řízených pohonů je počet otáček daného motoru. Je zřejmé, že s klesajícími otáčkami roste odolnost proti poklesům.

Obrázek 14 - Vliv otáček motoru na odolnost řízených pohonů při poklesu napětí



Převzato z: [10].

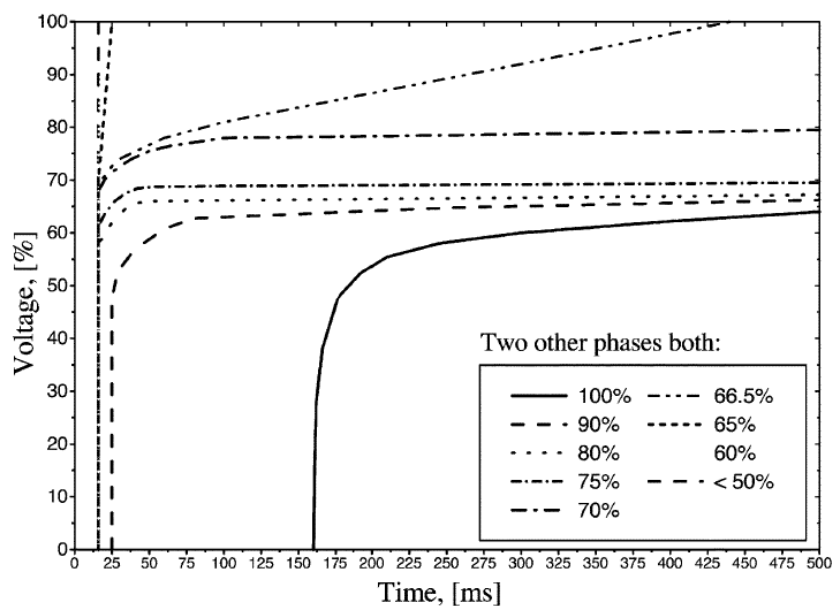
Někteří výrobci umožňují snížení úrovně reakce podpět'ové ochrany tak, aby se zlepšila schopnost překlenout symetrický i nesymetrický pokles napětí. V tomto případě může být připojena tlumivka, která omezí nabíjecí proudy po ukončení poklesu napětí. [10]

Nesymetrický pokles napětí na třífázově připojených řízených pohonech

Při nesymetrickém poklesu napětí je analýza chování zařízení složitější. V závislosti na vývoji napětí na jednotlivých fázích při poklesu, může být schopen usměřňovač nabíjet kondenzátory umístěné na sběrnici. V případě poklesu pouze na jedné fázi se třífázový usměřňovač chová jako jednofázový. Na stejnosměrné sběrnici je dvojnásobek napájecího kmitočtu. Také se zde zvyšuje napět'ové zvlnění a usměřňovačem procházejí různé proudy. V případě, že stejnosměrné napětí neklesne pod kritickou hodnotu podpět'ových ochran, jsou schopny řízené pohony pokles napětí překonat. Pokud napětí klesne pod kritickou mez, zareagují podpět'ové ochrany. Jejich chování je dáno velikostí kondenzátoru na sběrnici a spouštěcí mezí pro podpět'ové ochrany. Pokud není podpět'ová ochrana aktivována, může někdy docházet k odpojení po stovkách milisekund následkem reakce fázových ochran.

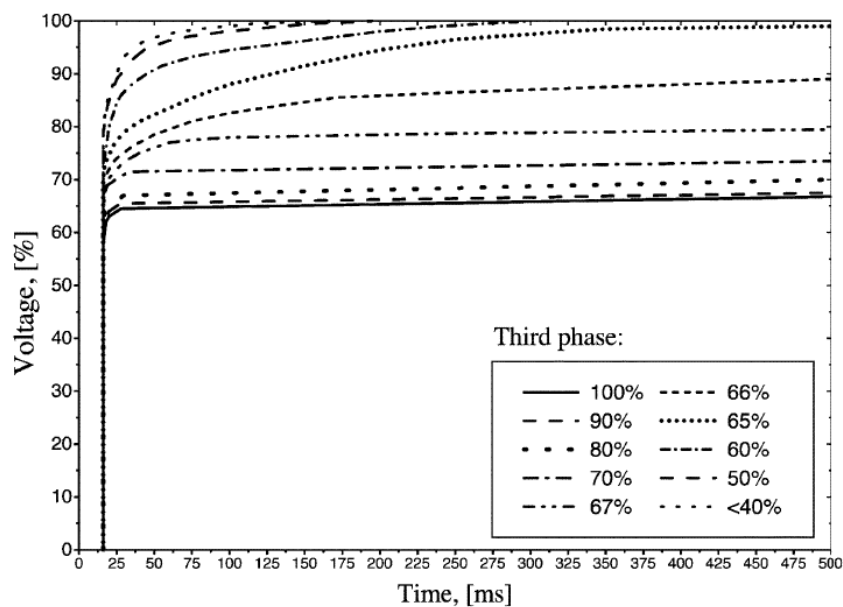
Za nesymetrického poklesu napětí, je veškerá energie přenášena pomocí fáze s nejvyšším zbývajícím napětím. To vede ke zvýšení proudu. V závislosti na impedanci zdroje, může tento jev způsobit další snížení napětí na koncových zařízeních. Obrázky č. 15 a 16 ukazují dopad nesymetrického poklesu napětí na řízené pohony. Na obrázku č. 15 jsou napět'ové toleranční křivky nesymetrického poklesu napětí s výrazným poklesem na jedné fázi. Dalším parametrem je velikost napětí na zbylých dvou fázích, o kterých lze říci, že s klesajícím napětím klesá schopnost odolat napět'ovému poklesu. Podobný příklad je na obrázku č. 16, kde je pokles na dvou fázích a toleranční křivky se mění se změnou velikosti napětí na fázi třetí. [10], [14]

Obrázek 15 - Toleranční napět'ové křivky pro nesymetrický pokles napětí na jedné fázi s různými hodnotami napětí na zbylých dvou fázích pro řízené pohony



Převzato z: [14].

Obrázek 16 - Toleranční napět'ové křivky pro nesymetrický pokles napětí na dvou fázích s různými hodnotami napětí na zbylé fázi pro řízené pohony



Převzato z: [14].

V závislosti na požadavcích v procesu může být citlivost řízených pohonů zvýšena pomocí tzv. kinetic buffering. Pokud lze tolerovat snížení rychlosti pohonů, bude se zařízení

s touto jednotkou snažit udržovat stejnosměrné napětí na sběrnici při poklesu napětí pomocí regenerace energie ze zátěže.

V případě výpadku řízeného pohonu v důsledku napěťového poklesu je motor uvolněn tak, aby se mohl volně otáčet. Po navrácení napětí na jmenovitou hodnotu lze motor aktivovat buď manuálně, nebo automaticky. Pokud se motor stále točí, lze využít letmého startu. Po aktivaci, proces restartu zjistí aktuální otáčky potřebné pro synchronizaci na požadovanou rychlost. V případě, že nejsou rychlostní čidla k dispozici, může doba trvání detekce rychlosti trvat několik milisekund až sekund v závislosti na konkrétním zařízení.[10],[14]

2.4.4. Tyristory řízená zařízení

Tyristory řízená zařízení, jako jsou například stejnosměrné pohony nebo usměrňovací jednotky obvykle využívají obvod s fázovým závěsem (PPL) k synchronizaci činnosti tyristorů vzhledem k střídavému napájecímu napětí. Typický obvod PPL potřebuje po poklesu napětí několik systémových cyklů ke stabilizaci. Zvláště, když jsou tyristory použity v režimu generování, poklesy napětí s fázovými skoky vedou k nekontrolovatelně vysokým proudům na usměrňovači. Tyto proudy mohou poškodit polovodičové pojistky nebo i samotné elektronické prvky.[10]

2.4.5. Programovatelné automaty PLC

Programovatelné automaty PLC slouží k řízení průmyslových procesů. Nesprávný chod zařízení má téměř vždy za následek přerušení procesu, nebo podmínky ohrožující zdraví. Typický PLC obsahuje napájecí zdroj, základní výpočetní jednotku (CPU) a analogové i digitální vstupy a výstupy (I/O moduly). Vstupní data jsou zpracovány softwarovým programem v procesoru generujícím výstupní signál k řízení procesů. Každá část PLC bude z hlediska poklesů napětí rozebrána samostatně.

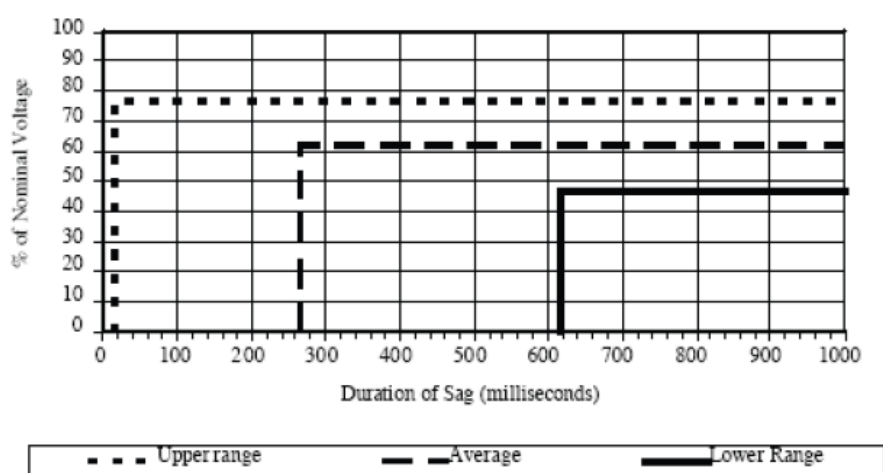
Napájecí zdroje PLC

K napájení PLC se používají spínané zdroje. Přestože jsou k dispozici jak stejnosměrné, tak střídavé vstupní zdroje napětí, nejčastěji používané jednotky využívají střídavý zdroj napětí 120V nebo 230V. Cílem jednotky je dodávat stejnosměrné napětí do všech fyzicky připojených zařízení ke sběrnici PLC. Tato zařízení zahrnují CPU a komunikační modul(y), stejně jako diskrétní a analogové vstupní a výstupní moduly.

Vzhledem k vážným důsledkům vyplývajících z poruch PLC, většina PLC zdrojů provádí nepřetržitou diagnostiku. Ochrana PLC neustále sleduje vstupní střídavé napětí, nebo stejnosměrný napěťový výstup a rozhoduje o vypnutí zařízení v případě poklesu napětí. V případě, že dojde k detekování závažného problému, napájecí zdroj předá informaci procesoru a ten následně kontrolovaně zastaví prováděný proces.

Pokud je vstupní střídavé napětí sledováno, PLC obvykle reagují na poklesy napětí již během prvního cyklu. Tato reakce může být nepřiměřeně rychlá v případě možnosti zachování funkce PLC pomocí energie uložené v kondenzátorech umístěných na sběrnici napěťového zdroje. Opačný případ může nastat v případě kontroly výstupního stejnosměrného napětí, kde je reakce na poklesy napětí zpomalena v důsledku energie uložené v kondenzátorech připojených ke stejnosměrné sběrnici. Kondenzátory udržují výstupní stejnosměrné napětí a zlepšují odolnost PLC proti napěťovým poklesům.[10]

Obrázek 17 - Horní a dolní rozsah napětí tolerančních křivek pro napájecí zdroje PLC



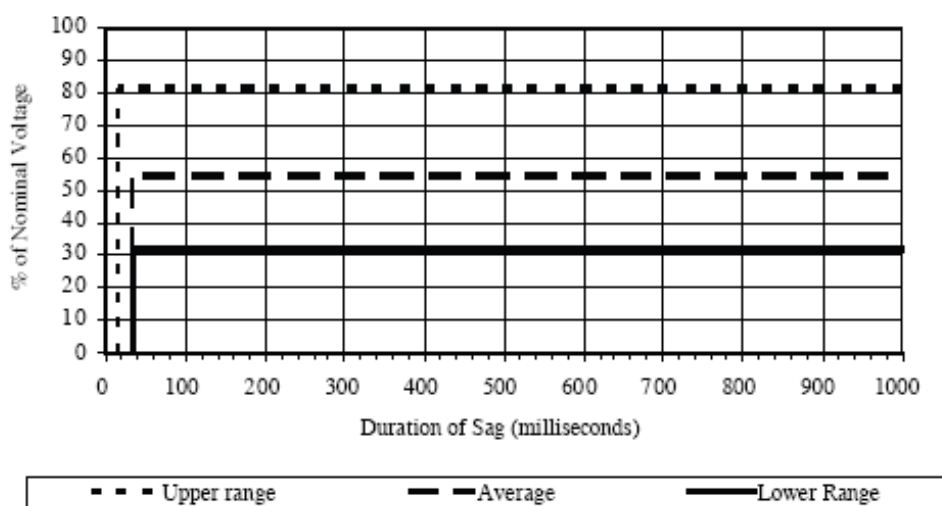
Převzato z: [10].

Vstupní a výstupní moduly

Vstupní a výstupní moduly se dělí na analogové a digitální. Náchylnost digitálních vstupů na poklesy napětí platí pouze v případě, že napájecí zdroje PLC nezpůsobili vypnutí systému (toto platí především pro PLC sledující stejnosměrné napětí). Digitální vstupy jsou navrženy tak, aby rychle reagovali na změnu vstupního signálu, což má také za následek rychlou reakci na změnu vstupního signálu v důsledku poklesu napětí.

V případě vstupních střídavých modulů, pokles napětí přichází okamžitě na vstupní svorky modulu. V případě stejnosměrných vstupních modulů, může externí DC zdroj zmírnit účinky poklesů napětí, za předpokladu, že nebude vstupní výkon pro snímače ovlivněn.[10]

Obrázek 18 - Toleranční křivky pro střídavé vstupy PLC



Převzato z: [10].

Diskrétní výstupní moduly jsou k dispozici buď jako AC nebo DC. Slouží ke spínání a rozepínání spouštěčů motorů, relé, elektromagnetů a kontrolky. Náchylnost diskrétního výstupního modulu je přímo závislá na napájecím vypínacím signálu PLC, stejně jako na citlivosti jednotlivých zatížení připojených k modulu. Vzhledem k tomu, že se výstupní modul chová jako přepínač pro jednotlivá zařízení, má malou schopnost ovlivnění poklesu napětí v systému. Pokud PLC rozhodne o ukončení činnosti v důsledku poklesu napětí, všechny diskrétní výstupní signály obvykle poklesnou.

Analogové vstupní moduly trvale přijímají stejnosměrný proudový nebo napěťový signál z procesních vysílačů (typicky 4-20 mA, 1-5 V, nebo 0-10 V). Stejnosměrné napájecí zdroje musí být zdrojem napětí nebo proudu pro vstupní analogový signál. Proto je citlivost na poklesy napětí u analogového vstupního modulu a procesních vysílačů závislá na citlivosti stejnosměrného napájecího zdroje.

Analogové výstupní moduly poskytují neustálý stejnosměrný napěťový/proudový signál pro připojená zařízení (např. pro regulaci otáček motoru). V závislosti na výrobci a typu modulu, lze analogové výstupní signály získat z napájení PLC prostřednictvím I/O, nebo externím DC napájením.[10]

Základní výpočetní jednotka (CPU)

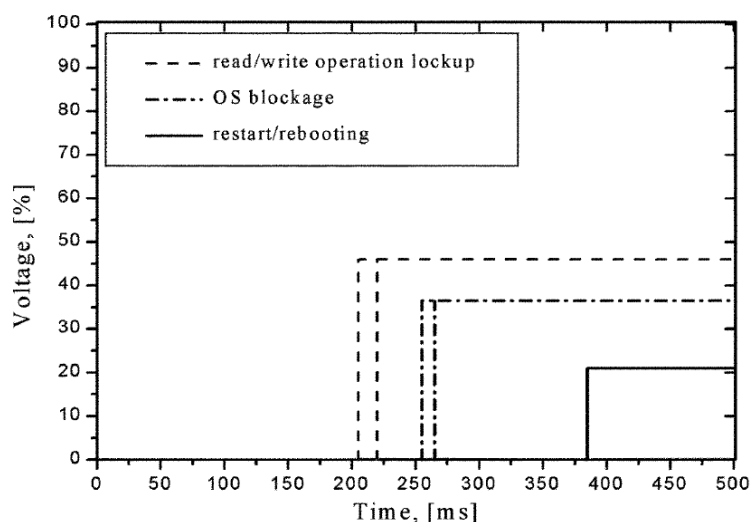
Základní výpočetní jednotka čte vstupní data, řeší problémy s nimi spojené a aktualizuje data výstupní. K udržení funkčnosti PLC se v případě výpadku využívá lithiová baterie. V případě poklesu napětí mohou být špatná vstupní data z narušených snímačů zpracována procesorem, což může vést k nesprávným výstupním akcím, nebo k přerušení procesu.[10]

2.4.6. Osobní počítače PC

Osobní počítače hrají velmi často hlavní roli v mnoha procesech, např. při řízení v reálném čase nebo komunikační účely. Obvykle jsou napájeny pomocí AC/DC měniče, který převádí střídavé napětí na stejnosměrné. Střídavé napětí je usměrňováno pomocí diodového usměrňovače a vyhlazovacího kondenzátoru, který slouží ke snížení zvlnění výsledného napětí.

Většina počítačů je navržena pro provoz v síti 230V/50Hz (120V/60Hz). Pokud dojde v síti k poklesu napětí, může to znamenat ohrožení správné funkce zařízení. Obvykle se citlivost osobních počítačů udává pomocí napěťové toleranční křivky. Z této křivky je možné odečíst při jak hlubokém a dlouhém poklesu napětí dojde k problémům se čtením a zápisem, zablokování operačního systému nebo k restartu počítače. Problémy se čtením a zápisem a zablokováním operačního systému jsou označovány jako softwarová selhávající kritéria. U různých druhů PC vedly poklesy napětí k různým napěťovým tolerančním křivkám, což naznačuje vyšší citlivost než v případě hardwarových kritérií.[10],[15]

Obrázek 19 – Napěťové toleranční křivky pro PC se spínacím napájecím zdrojem



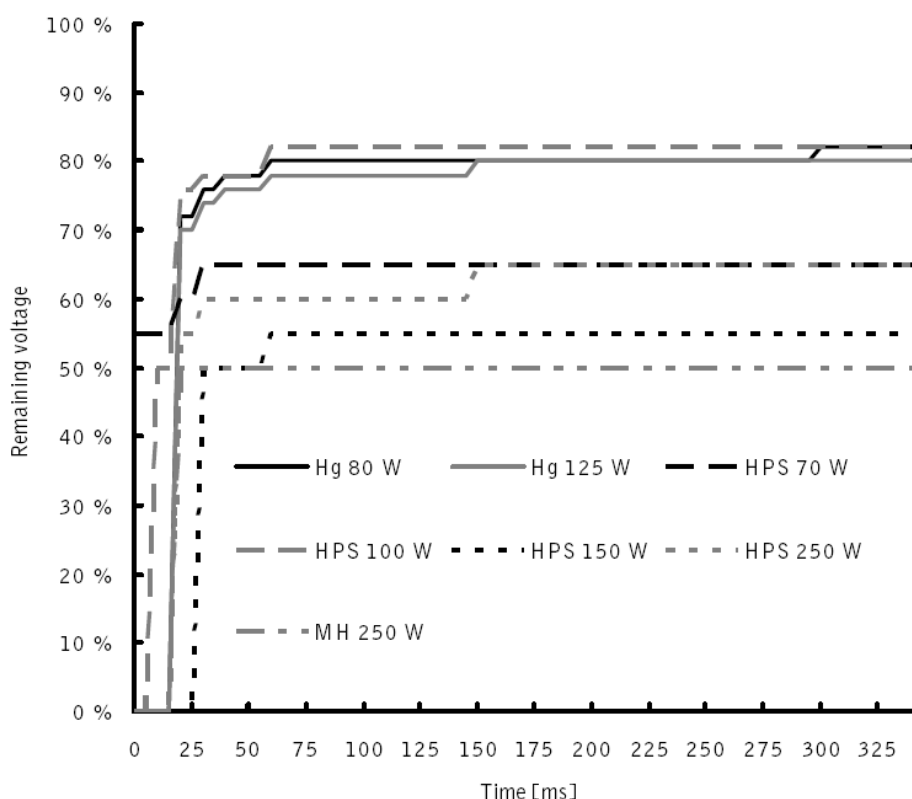
Převzato z: [15]

2.4.7. Svítidla

Pokles napětí může způsobit problémy s veřejným osvětlením, protože vede ke zhasínání lamp. V případě žárovek může dojít při poklesu napětí k zajiskření, což není považováno za závažnou poruchu. U vysokotlakých svítidel může docházet ke zhášení a následnému několikaminutovému znovu rozsvěcení.

Testy vysokotlakých sodíkových výbojek ukázali, jak tři různé elektronické předřadníky reagují na poklesy napětí. Výsledky ukázaly schopnost, u všech tří předřadníků pro tento typ svítidla, zachovat osvětlení bez přerušení alespoň polovinu cyklu poklesu napětí. Dále test ukázal, že předřadníky jsou schopny udržet světlo až do poklesu do 62% jmenovitého napětí. Po překročení této hodnoty dojde k zhasnutí a trvá přibližně minutu k znovu rozsvícení a tři minuty k dosažení maximálního výkonu. Dále ovlivňuje chování osvětlení při poklesu napětí stáří svítidla, novější nejsou tak citlivé.[16]

Obrázek 20 - Napět'ové toleranční křivky pro sedm výbojek (Hg = rtuťová, HPS = vysokotlaká sodíková, MH = halogenidová)



Převzato z: [17]

3. Metody výpočtu pro predikci poklesů napětí

Již řadu let jsou na trhu dostupná zařízení zaznamenávající rušení v napájecí síti. Moderní přístroje provádějí řadu měření a výsledky elektronicky zaznamenávají k dalšímu zpracování počítači. Výsledkem je analýza dat různými způsoby, takže může postačovat jeden soubor dat pro řadu požadovaných měření.

Mnoho přístrojů zaznamenává události, které neodpovídají standardům a jsou nějakým způsobem vymezeny (napětí a jeho toleranční meze, toleranční meze poklesů napětí vycházející z křivek CBEMA, ITIC nebo ANCI, atd.). Tento způsob měření není náročný na objem dat a usnadňuje jejich zpracování, ale není možné zjistit počet událostí uvnitř nastavených tolerančních hodnot. Vhodným nastavením těchto mezí se vyhýbáme řadě zbytečných dat prodlužující jejich analýzu, nebo nezaznamenání důležité informace.[18]

Podobný způsob zaznamenávání je označován jako *plně otevřené monitorování* a byl prezentován firmami Reliable Power Meters Inc. (USA) a Rhopoint Systems Ltd (UK). Monitor v tomto případě umožňuje shromáždění všech dat s velice úzce nastavenými tolerančními mezemi, které se mění v závislosti na stávajících podmínkách. Toleranční pásma jsou využívána až při následné analýze dat tak, že nevznikají mrtvá místa a nedochází ke ztrátě dat.[18]

Výpočtové predikční metody jsou další možností jak zjistit výskyt poklesů napětí v síti. Vycházejí z úvahy, že hlavní příčinou poklesů napětí v síti jsou poruchy a následné reakce ochran a opětného zapínání. Jedná se tedy o simulační metody, jejichž výstupem je pravděpodobnostní odhad poklesů napětí v daném místě. K výpočtu je zapotřebí model sítě a vstupní data. Ty jsou tvořena konfigurací sítě, parametry prvků v síti a údaje o počtu zkratů v síti.[3]

Přesnost metod je závislá od přesnosti vstupních dat. Největší roli zde hrají údaje o počtu poruch v síti, jelikož z těchto stavů v minulosti dokážeme stanovit budoucí poklesy napětí v síti. Zvětšení přesnosti výsledků lze dosáhnout seskupením prvků do stochasticky shodných skupin, např. venkovní a kabelová vedení.[3]

Nejčastější metody pro stochastickou předpověď poklesu napětí:

- **Metoda míst zkratů** vypočítává vlastnosti poklesů napětí pro řadu poruch rozmístěných po celém systému sítě. Prvním krokem je vybrání míst poruch. Poruchy se mohou vyskytnout

na kterémkoliv místě elektrizační soustavy a jsou náhodně rozděleny. Volba poruchových pozic ovlivňuje přesnost výsledků a je zřejmé, že se zvyšuje s počtem těchto pozic.[19]

- **Metoda kritických vzdáleností** vypočítává pozici poruchy pro danou velikost poklesu napětí, to znamená část systému, ve které porucha vede k poklesu o daných vlastnostech a požadovaném místě. Počet poklesů pod stanovenou prahovou hodnotu bude roven počtu poruch, které jsou blíže zátěži než indikované pozici. Tato metoda je vhodná pouze pro radiální síť.[19]

Ostatní méně používané metody:

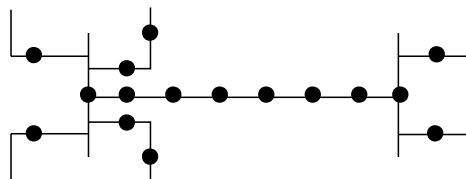
- **Metoda Monte Carlo** spočívá v opakování deterministického řešení daného problému, kde každé řešení odpovídá množině deterministických hodnot z dané vstupní náhodné proměnné. Výpočet se provádí opakovaně a výsledkem se obvykle stává pravděpodobnost určitého jevu a jeho příslušná distribuční funkce. Simulace Monte Carlo je založena na generování náhodné proměnné z rozložení pravděpodobnosti, které popisuje potřebnou náhodnou proměnnou. Aplikace této metody na složité problémy může být velmi náročná, avšak v současném stavu výpočetní techniky nachází tato metoda uplatnění.
- **Rychlá metoda pro určení oblasti ohrožení** lze oproti metodě kritických vzdáleností využít také pro zauzlované síť. Počet poklesů napětí, během nichž napětí poklesne pod hodnotu kritického napětí, je roven celkovému počtu poruch, které vzniknou v oblasti ohrožení. Pro nalezení kritických bodů, které na vedeních vytyčují oblast ohrožení, se využívá rovnic popisujících závislost postporuchového napětí v daném uzlu na umístění poruchy podél vedení. Tato rovnice je vytvořena s využitím impedanční matice soustavy Z_{bus} a je platná obecně pro všechna vedení.
- **Metoda využívající funkci hustoty pravděpodobnosti poklesů** nestanovuje počet poklesů napětí pomocí vytýčení oblasti ohrožení, ale pomocí funkce hustoty pravděpodobnosti poklesů napětí. Ta je odvozena z rovnic pro výpočet postporuchového napětí, využívajících impedanční matici soustavy Z_{bus} .
- **Metoda využívající matici poklesů napětí** se podobá předchozí metodě, ale není tak náročná. Taktéž využívá rovnic pro výpočet postporuchového napětí a impedanční matici soustavy Z_{bus} .

[3],[19]

3.1. Metoda míst zkratů

Jedná se o nejčastěji používanou metodu založenou na systematickém výpočtu zkratových poměrů v různých částech sítě. Z vypočtených postporuchových napětí a údajů o poruchovosti v jednotlivých vypočtených místech (místech zkratů) se určuje četnost poklesů napětí v žádaných uzlech sítě.[3]

Obrázek 21 - Volba míst zkratů



● – zvolená místa zkratů

Zdroj: [3], vlastní zpracování

Tato metoda není výpočtově náročná a je vhodná jak pro radiální tak zauzlené sítě. Přesnost metody je dána počtem zvolených míst zkratů, s jejich větším množstvím přesnost metody roste. To vede k velkému množství výpočtů, proto není metoda vhodná pro rozsáhlé sítě. K výpočtům lze využít počítačových programů.[3]

Základní kroky při výpočtu:

- I. **Určení oblasti sítě a zvolení míst zkratů**, tzn. místa (rozvodna, části vedení) ve kterých případný zkrat způsobí pokles napětí v námi sledovaném místě. Způsob volby jednotlivých míst zkratů může, ale nemusí být systematický. Lze přihlídnout k počtu poruch v některých exponovaných vedení nebo jejich úsekců.
- II. **Stanovení intenzity poruch během roku pro každé zvolené místo a typ zkratu** (1f, 2f, 2fz, 3f zkraty). U poruch na vedeních lze poruchovost vedení rozdělit např. rovnoměrně nebo exponenciálně.
- III. **Výpočet vlastností poklesů napětí**. Určení velikosti napětí ve zvolených uzlech sítě při poruše v místě zkratu (vychází z výsledků výpočtů zkratových poměrů) a stanovení doby trvání poklesu napětí (dáno dobou trvání poruchy, odhadnuta z doby reakce ochrany a vypínací doby příslušného vypínače). Výpočet se provádí pro všechny typy zkratů.

IV. **Stanovení celkového počtu poklesů podle jejich velikosti nebo doby trvání.** Počet poklesů napětí v důsledku zkratů v daném místě zkratu je roven četnosti výskytu zkratů v tomto místě. Součet počtu poklesů o stejné hloubce a době trvání, které byly způsobeny zkraty v jednotlivých místech zkratů, stanovuje celkový počet poklesů napětí v uzlu sítě.[3]

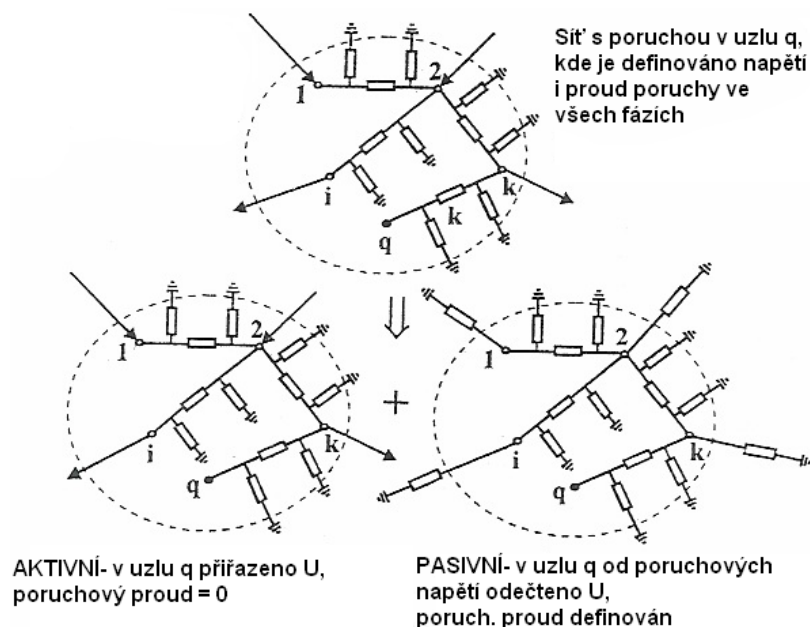
3.1.1. Metoda pro výpočet zkratových poměrů v síti

Pro výpočty zkratových poměrů se využívá metody superpozice předporuchového provozního stavu a vlastního poruchového stavu. Síť s vzniklou poruchou je rozdělena na dvě samostatně řešené sítě:

- I. **Aktivní** – představuje běžný bezporuchový stav sítě
- II. **Pasivní** – představuje poruchový stav způsobený poruchou v síti

V uzlu, kde vznikl zkrat, je uvažováno předporuchové napětí U_k . V případě kovového třífázového zkratu je v tomto uzlu napětí nulové, proto se v pasivní síti uvažuje předporuchové napětí opačné orientace $-U_k$. Výsledné hodnoty uzlových napětí a větvových proudů jsou dány součtem výsledných hodnot aktivní a pasivní sítě.[20]

Obrázek 22 - Rozložení sítě s poruchou v bodě q



Převzato z: [20]

Řešení aktivní sítě

Uzlová napětí a větvové proudy běžného bezporuchového stavu sítě se vypočítají pro ustálený chod sítě (např. metodou Rapson-Newton, Gauss-Seidel). Pokud uvažujeme stav sítě naprázdno, dojde ke zjednodušení a tento krok se vynechává, protože všechna uzlová napětí jsou stejná, obvykle rovna U_n , a větvové proudy nulové. V případě uvažování rozdílného napětí od hodnoty U_n je napětí ve všech uzlech rovno $c \cdot U_n$, kde c je napěťový součinitel uvažovaný při výpočtu zkratů v nahrazované soustavě.[20]

Řešení pasivní sítě

V uzlu s poruchou je uvažováno napětí $-U_k$ ($= -c \cdot U_n$), všechny ostatní zdroje představují pasivní prvky modelované příslušnou impedancí zapojenou mezi příslušným uzlem a zemí. Výpočet poměrů v pasivní síti vychází z metody uzlových napětí, označované jako metoda zkratové impedanční matice. Uzlová napětí v pasivní síti reprezentují změnu velikosti uzlových napětí způsobenou poruchovým proudem I_k a vypočítají se z rovnic vyjádřených maticově:

$$\Delta \mathbf{U}_f = \mathbf{Z}_{bus} \cdot \mathbf{I} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_j \\ \dots \\ -\bar{U}_k \\ \dots \\ \bar{U}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \bar{Z}_{1j} & \dots & \bar{Z}_{1k} & \dots & \bar{Z}_{1N} \\ \bar{Z}_{j1} & \bar{Z}_{jj} & \dots & \bar{Z}_{jk} & \dots & \bar{Z}_{jN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{Z}_{k1} & \bar{Z}_{kj} & \dots & \bar{Z}_{kk} & \dots & \bar{Z}_{kN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{Z}_{N1} & \bar{Z}_{Nj} & \dots & \bar{Z}_{Nk} & \dots & \bar{Z}_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ -\bar{I}_k \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}$$

kde: $\Delta \mathbf{U}_f = [\bar{U}_1 \ \bar{U}_j \ \dots \ -\bar{U}_k \ \dots \ \bar{U}_N]^T$ je vektor uzlových napětí, jediné známé napětí je napětí v řádce (uzlu) k ,

$\mathbf{I} = [0 \ 0 \ \dots \ -\bar{I}_k \ \dots \ 0]^T$ je vektor uzlových (injektovaných) proudů

\mathbf{Z}_{bus} je impedanční matice soustavy řádu N , kde N je počet uzlů sítě.

Z rovnice (1) vyplývá, že poruchový proud v uzlu k , kde vznikl zkrat, se vypočte jako:

$$\bar{I}_k = \frac{\bar{U}_k}{\bar{Z}_{kk}} \quad (2)$$

kde: \bar{Z}_{kk} (prvek impedanční matice) představuje zkratovou impedanci v uzlu k .

Je-li znám zkratový proud, lze z rovnice (1) vypočítat uzlová napětí:

$$\bar{U}_j = -\bar{Z}_{jk} \cdot \bar{I}_k = -\bar{Z}_{jk} \cdot \frac{\bar{U}_k}{\bar{Z}_{kk}} \quad (3)$$

Větвовé proudy se pak určí na základě vypočtených uzlových napětí:

$$\bar{I}_{ij} = \frac{\bar{U}_i - \bar{U}_j}{\bar{Z}_{vij}} = -\frac{\bar{Z}_{ik} - \bar{Z}_{jk}}{\bar{Z}_{vij}} \cdot \bar{I}_k \quad (4)$$

kde: \bar{Z}_{vij} je impedance větve (např. vedení) mezi uzly sítě i a j .

[21],[3]

Složená síť

Superpozicí příslušných hodnot aktivní a pasivní sítě dostáváme výsledná uzlová napětí a větвовé proudy. Velikost napětí během poruchy je dána součtem napětí v bezporuchovém stavu a napětí pasivní sítě vycházející z rovnice (3). Zápis uzlových napětí v maticovém tvaru tedy vypadá takto:

$$\mathbf{U}_f = \mathbf{U}_0 + \Delta\mathbf{U}_f = \mathbf{U}_0 - \mathbf{Z}_{bus} \cdot \mathbf{I} \quad (5)$$

kde: \mathbf{U}_0 je vektor uzlových napětí v bezporuchovém stavu,

$\Delta\mathbf{U}_f$ je vektor změn uzlových napětí vlivem poruchy (uzlová napětí pasivní sítě viz (3)),

\mathbf{I} je vektor uzlových proudů.

Předchozí rovnice vyjádřená pomocí vektorů se zjednoduší na tento tvar:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{f1} \\ \vdots \\ \bar{U}_{fk} \\ \vdots \\ \bar{U}_{fN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U}_{01} \\ \vdots \\ \bar{U}_{0k} \\ \vdots \\ \bar{U}_{0N} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Z}_{1k} \cdot \bar{I}_k \\ \vdots \\ \bar{Z}_{kk} \cdot \bar{I}_k \\ \vdots \\ \bar{Z}_{Nk} \cdot \bar{I}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U}_{01} \\ \vdots \\ \bar{U}_{0k} \\ \vdots \\ \bar{U}_{0N} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Z}_{1k} \cdot \frac{\bar{U}_{0k}}{\bar{Z}_{kk}} \\ \vdots \\ \bar{U}_{0k} \\ \vdots \\ \bar{Z}_{Nk} \cdot \frac{\bar{U}_{0k}}{\bar{Z}_{kk}} \end{bmatrix}$$

Z takto zapsané rovnice je patrné, že výsledné napětí v uzlu k při kovovém 3f zkratu v tomto uzlu je nulové: $\bar{U}_{fk} = \bar{U}_{0k} - \bar{U}_{0k} = 0$.

Napětí v uzlu j při třífázovém zkratu v uzlu k lze z rovnice (5) vyjádřit:

$$\bar{U}_j = \bar{U}_{0j} - \bar{Z}_{jk} \cdot \frac{\bar{U}_{0k}}{\bar{Z}_{kk}} \quad (6)$$

kde: \bar{U}_{0j} a \bar{U}_{0k} jsou napětí před poruchou v uzlu j resp. k

[20],[3]

Nesymetrické zkratové poruchy

V případě výpočtu nesymetrických zkratů se síť modeluje pomocí sousledné, zpětné a netočivé složky. Výše uvedené rovnice (5) lze vyjádřit pro jednotlivé složky soustavy takto:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_f^{(1)} &= \mathbf{U}_0^{(1)} + \Delta \mathbf{U}_f^{(1)} = \mathbf{U}_0^{(1)} - \mathbf{Z}_{\text{bus}}^{(1)} \cdot \mathbf{I}^{(1)} \\ \mathbf{U}_f^{(2)} &= \Delta \mathbf{U}_f^{(2)} = -\mathbf{Z}_{\text{bus}}^{(2)} \cdot \mathbf{I}^{(2)} \\ \mathbf{U}_f^{(0)} &= \Delta \mathbf{U}_f^{(0)} = -\mathbf{Z}_{\text{bus}}^{(0)} \cdot \mathbf{I}^{(0)} \end{aligned} \quad (7)$$

kde: $\mathbf{Z}_{\text{bus}}^{(1)}$ impedanční matice sousledné složky,

$\mathbf{Z}_{\text{bus}}^{(2)}$ impedanční matice zpětné složky,

$\mathbf{Z}_{\text{bus}}^{(0)}$ impedanční matice netočivé složky.

Symetrické napětí U_0 v běžném stavu sítě bez poruchy má pouze souslednou složku. Vektory jednotlivých složkových proudů lze vyjádřit podobně jako v rovnici (2), jednotlivé složky proudu I_k pro souslednou, zpětnou a netočivou soustavu jsou odlišné dle druhu nesymetrického zkratu:

- jednofázový zkrat:

$$\bar{I}_k^{(1)} = \bar{I}_k^{(2)} = \bar{I}_k^{(0)} = \frac{\bar{U}_{0k}}{\bar{Z}_{kk}^{(1)} + \bar{Z}_{kk}^{(2)} + \bar{Z}_{kk}^{(0)}} \quad (8)$$

- dvoufázový zkrat

$$\bar{I}_k^{(1)} = \bar{I}_k^{(2)} = \frac{\bar{U}_{0k}}{\bar{Z}_{kk}^{(1)} + \bar{Z}_{kk}^{(2)}}, \quad \bar{I}_k^{(0)} = 0 \quad (9)$$

- dvoufázový zemní zkrat

$$\bar{I}_k^{(1)} = \frac{\bar{U}_{0k}}{\bar{Z}_{kk}^{(1)} + \frac{\bar{Z}_{kk}^{(2)} \cdot \bar{Z}_{kk}^{(0)}}{\bar{Z}_{kk}^{(2)} + \bar{Z}_{kk}^{(0)}}}, \quad \bar{I}_k^{(2)} = \frac{-\bar{Z}_{kk}^{(0)}}{\bar{Z}_{kk}^{(2)} + \bar{Z}_{kk}^{(0)}} \cdot \bar{I}_k^{(1)}, \quad \bar{I}_k^{(0)} = \frac{-\bar{Z}_{kk}^{(2)}}{\bar{Z}_{kk}^{(2)} + \bar{Z}_{kk}^{(0)}} \cdot \bar{I}_k^{(1)} \quad (10)$$

Výsledná uzlová napětí a větvové proudy se vypočítají složením sousledné, zpětné a netočivé složky, s využitím vztahu:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \bar{I}^{(1)} \\ \bar{I}^{(2)} \\ \bar{I}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

kde: $\bar{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

$$\bar{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Výpočet zkratových poměrů v síti je tedy založen na řešení soustavy lineárních komplexních algebraických rovnic pro souslednou, popř. zpětnou či netočivou soustavu ve tvaru:

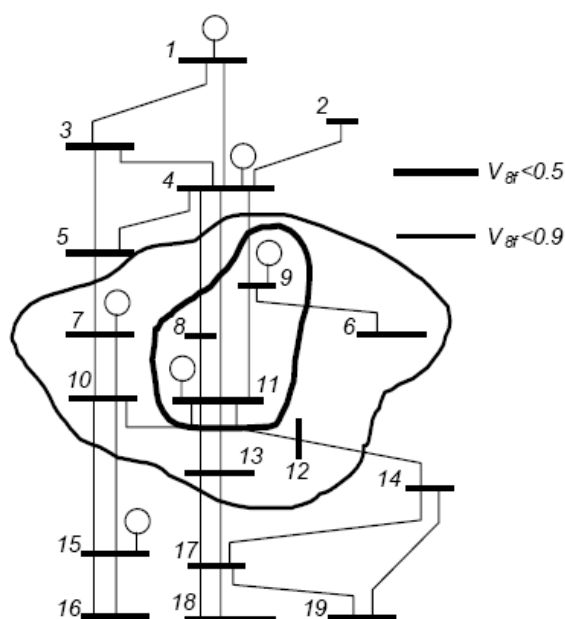
$$\begin{aligned} \mathbf{U}^{(1)} &= \mathbf{Z}_{\text{bus}}^{(1)} \cdot \mathbf{I}^{(1)} \\ \mathbf{U}^{(2)} &= \mathbf{Z}_{\text{bus}}^{(2)} \cdot \mathbf{I}^{(2)} \\ \mathbf{U}^{(0)} &= \mathbf{Z}_{\text{bus}}^{(0)} \cdot \mathbf{I}^{(0)} \end{aligned} \quad (11)$$

[3],[21]

3.1.2. Oblast ohrožení a postporuchová matice napětí

Oblast ohrožení byla vytvořena k přehlednější orientaci v síti během poklesu napětí. Je vztažena k uzlu sítě, pomocí něhož je vytýčena oblast, ve které všechny zkraty způsobí pokles napětí pod určitou kritickou hladinu.[22]

Obrázek 23 - Oblast ohrožení uzlu 8 pro různé hodnoty kritického napětí



Převzato z: [22]

K určení této oblasti se využívá hodnot postporuchových napětí ze kterých je možné sestavit matici, pomocí níž lze určit velikost uzlových napětí při zkratech v jednotlivých místech sítě. Vektor postporuchových uzlových napětí při zkratu v uzlu k , vypočítaný z rovnice (6) ve formě matice, tvoří k -tý sloupec čtvercové matice postporuchových napětí:

$$\mathbf{U}_f = [U_{f1} \quad U_{f2} \quad \dots \quad U_{fk} \quad \dots \quad U_{fN}]^T \quad (12)$$

Stanovením postporuchových napětí pro zkraty ve všech uzlech sítě lze postupně sestavit celou matici postporuchových napětí \mathbf{U}_{dfv} :

$$\mathbf{U}_{dfv} = \begin{bmatrix} U_{f11} & U_{f1j} & \dots & U_{f1k} & \dots & U_{f1N} \\ U_{ff1} & U_{ffj} & \dots & U_{ffk} & \dots & U_{ffN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{fk1} & U_{fkj} & \dots & U_{fkk} & \dots & U_{fkN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{fN1} & U_{fNj} & \dots & U_{fNk} & \dots & U_{fNN} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Diagonální prvky matice udávají napětí v uzlu s poruchou. Napětí při zkratu v uzlu k pro uzly $1, 2, \dots, k, \dots, N$ je dáno k -tým sloupcem. Naopak k -tý řádek matice udává hodnotu napětí při zkratech v uzlech $1, 2, \dots, k, \dots, N$.

V případě nesymetrických zkratů je nutné vypočítat postporuchová uzlová napětí pro souslednou, zpětnou a netočivou složkovou soustavu analogicky pomocí vztahů (7) a dále se sestavují se jednotlivé matice postporuchových napětí.[3]

3.1.3. Umístění a množství míst zkratů

Přesnost metody a následné stanovení oblasti ohrožení se zlepšuje s větším množstvím simulovaných zkratů. Proto není metoda vhodná pro rozsáhlé sítě. Výpočty provádíme v oblasti sítě, kde je kritická hodnota napětí $90\% U_n$. Napětí pod touto úrovní je považováno za pokles napětí. Rozměr takovéto sítě je závislý na úrovni napětí nebo vzájemném propojení sítí různých napěťových hladin.

Rozhodujícím faktorem pro určení vzdáleností mezi jednotlivými zkraty je vzdálenost místa zkratu od místa, kde zjišťujeme velikost poklesu napětí. Bližší zkraty výrazněji ovlivňují poklesy napětí na bližších uzlech, vzdálené poklesy mají charakter spíše mělkého poklesu. Lze tedy říci, že čím blíže jsme vyšetřovanému uzlu, tím by se měla zvětšovat hustota míst zkratů. V opačném případě dochází ke značné chybě v případě hlubokých poklesů.

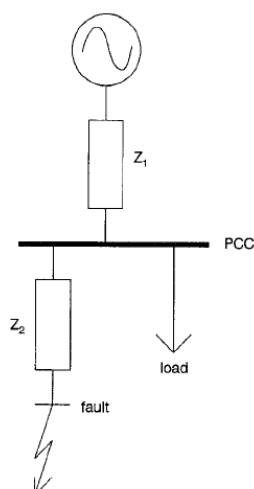
Rozdělení poruch podél vedení se ve většině případů uvažuje rovnoměrné. Poruchovost v jednotlivých místech zkratů rovná celkové poruchovosti daného vedení dělené počtem mezizkratů na tomto vedení. Lze použít normální či exponenciální rozdělení.[3]

3.2. Metoda kritických vzdáleností

Tato metoda je založená na základě napěťového děliče známého z teorie obvodů. Jejím cílem není poskytnout přesné výsledky, ale získat odhad dostatečný pro řadu aplikací.

Jak již bylo několikrát zmíněno, poklesy jsou charakterizovány jejich velikostí (napětím při poruše) a dobou trvání. Velikost je dána elektrickou vzdáleností od poruchy a doba trvání dobou do odstranění poruchy. Metoda kritických vzdáleností je zaměřená na velikost napětí při poklesu, doba trvání hraje pouze vedlejší roli.[23]

Obrázek 24 - Napět'ový dělič pro výpočet poklesu napětí



Převzato z: [23]

U poruch v radiální síti, lze vypočítat pokles napětí ve společném napájecím bodě (PCC) pomocí napět'ového děliče (obrázek 23).

$$\bar{u}_{PCC} = \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \quad (14)$$

kde: $\bar{Z}_1 = R_1 + jX_1$ je impedance ve společném napájecím bodě,

$\bar{Z}_2 = (r_2 + jx_2) \cdot l$ je impedance na vedení mezi PPC a místem poruchy a l vzdálenost mezi těmito místy

Tato rovnice je platná ze předpokladu, že je proud zátěže ve srovnání s poruchovým proudem zanedbatelný a předporuchové napětí je shodné s napětím zdroje. Což je možné, neboť impedance zdroje je v poměru s impedancí \bar{Z}_1 zanedbatelná.

Rovnice (14) může být použita k výpočtu velikosti poklesu napětí v závislosti na vzdálenosti (obrázek 24). Velikost napětí během poklesu roste se vzdáleností a vyšší hodnotou zdánlivého výkonu. Rovnici lze tedy zapsat také jako:

$$u_{PCC} = 1 - \frac{S_{poruch}}{S_{PCC}} \quad (15)$$

kde: S_{poruch} je hodnota zdánlivého výkonu v místě poruchy

S_{PCC} je hodnota zdánlivého výkonu ve společném napájecím bodě

[23],[24]

V místě PCC poklesne napětí pod kritickou hodnotu napětí u_{krit} v případě, že nastane zkrat v kterémkoliv místě do vzdálenosti l_{krit} od PCC. Pokud uvažujeme rovnost poměru X/R zdroje i vedení lze vyjádřit kritickou vzdálenost vztahem:

$$l_{krit} = \frac{Z_1}{z_2} \cdot \frac{u_{krit}}{1-u_{krit}} \quad (16)$$

Počet poklesů napětí, během nichž dojde k poklesu napětí pod kritickou hodnotu napětí je roven celkovému počtu poruch, které vzniknou v oblasti ohrožení. Celkový počet poruch je stanoven z dat o poruchovosti vedení a rozvoden. [3],[23]

Přesněji lze kritickou vzdálenost vyjádřit vztahem:

$$l_{krit} = \frac{Z_1}{z_2} \cdot \frac{u_{krit}}{1-u_{krit}} \cdot \left(\frac{u_{krit} \cdot \cos \alpha + \sqrt{1 + u_{krit}^2 \sin^2 \alpha}}{1 + u_{krit}} \right) \quad (17)$$

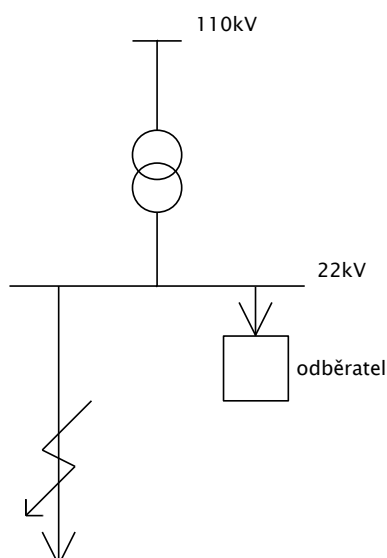
kde: α je rozdíl úhlů impedance zdroje a vývodu, $\alpha = \arctan\left(\frac{x_1}{R_1}\right) - \arctan\left(\frac{x_2}{r_2}\right)$

Pro odhad očekávaného počtu poklesů na určitém místě zatížení, je nutné vypočítat kritickou vzdálenost pro každý možný PCC. Z těchto výsledků pak lze stanovit oblast ohrožení. Každý zkrat v rámci exponované plochy, který překročí určitou dobu, povede k vypnutí citlivých zařízení. Očekávaný počet poklesů lze jednoduše získat přidáním očekávaného počtu poruch v exponované oblasti. Ten může být získán z běžných statistik sítě.

Ačkoli se ve skutečnosti poměr X/R zdroje a vývodu neshoduje, chyba při výpočtu kritické vzdálenosti pomocí vztahu (16) dosahuje pouze několika procent a pro většinu sítí, kde je rozdíl mezi úhlem impedance zdroje a vývodu do 30°, se tento vztah považuje za přijatelný.

Výše uvedené vztahy platí pouze pro třífázové poruchy, kde hodnoty impedancí představují sousledné impedance. V případě jednofázového zkratu impedance v rovnicích představuje součet sousledné, zpětné a netočivé složky impedance, pro dvoufázový zkrat součet sousledné a zpětné složky impedance. Napětí v předcházejících rovnicích představují v případě jednofázového zkratu fázové napětí poškozené fáze, pro dvoufázový zkrat pak napětí mezi poškozenými fázemi.

[3],[23],[24]

Aplikace metody na modelový případ sítě při uvažování reálných parametrů**Parametry:**

Síť: $S_k^{II} = 1000\text{MVA}$
(2000MVA)

Transformátor: $S_{nT} = 40\text{MVA}$
 $u_k = 9\%$
 $\Delta P_k = 270\text{kW}$

Vedení: $\text{AlFe4 } 95\text{mm}^2$
 $R_k = 0,38\Omega/\text{km}$
 $X_k = 0,35\Omega/\text{km}$

K výpočtu byla uvažována pouze reaktance jednotlivých prvků.

Síť

$$Z_s = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k^{II}} = \frac{1,1 \cdot (22 \cdot 10^3)^2}{1000 \cdot 10^6} = 532,4\Omega$$

$$X_s = Z_s \cdot 0,995 = 532,4 \cdot 0,995 = 529,74\Omega$$

Transformátor

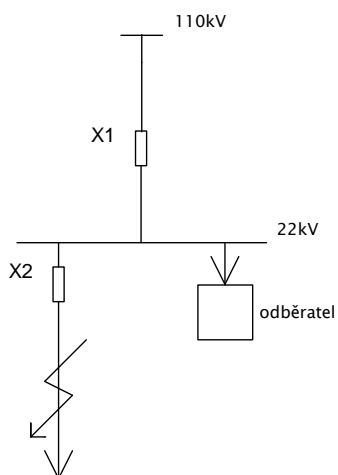
$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{nT}} = \frac{9}{100} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{40 \cdot 10^6} = 1,09\Omega$$

$$R_T = \Delta P_k \cdot \frac{U_n^2}{S_{nT}^2} = 270 \cdot 10^3 \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{(40 \cdot 10^6)^2} = 0,082\Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{1,09^2 - 0,082^2} = 1,085\Omega$$

Vedení (pro $l=1\text{km}$):

$$X_V = X_k \cdot l = 0,35 \cdot 1 = 0,35\Omega$$

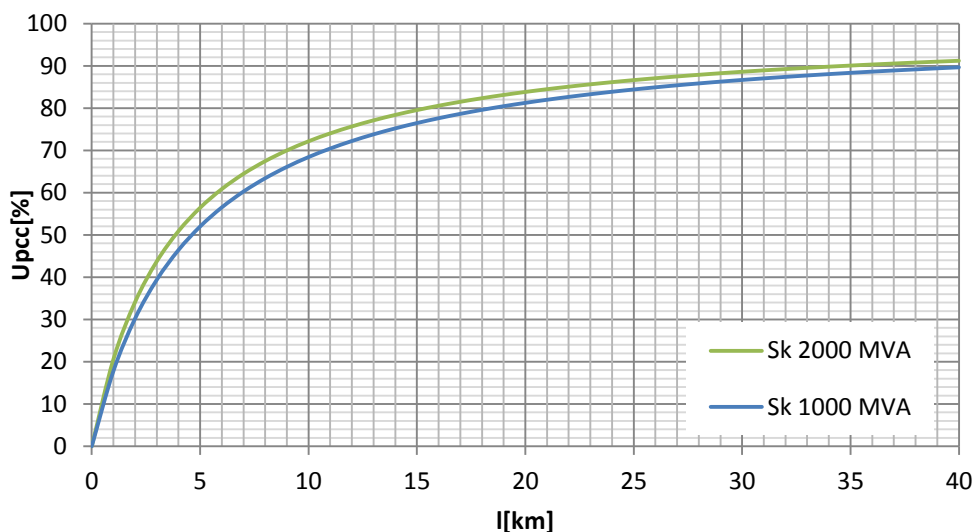


$$X_1 = X_S + X_T = 529,74 + 1,085 = 530,82\Omega$$

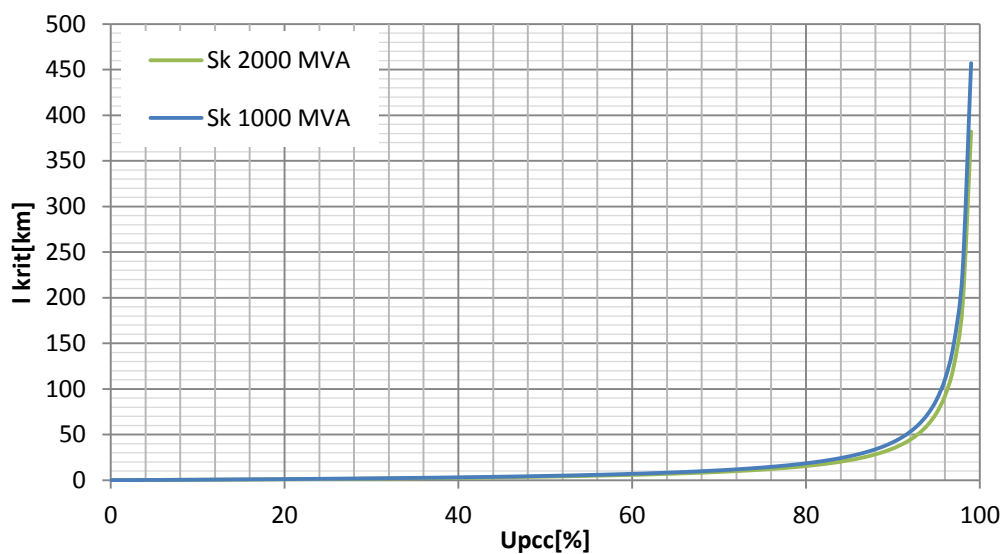
$$X_2 = X_V = 0,35\Omega$$

$$U_{PCC} = \frac{X_2}{X_1 + X_2} = \frac{0,35}{0,35 + 530,82} = 0,066[\%]$$

Graf č. 4 - Vliv vzdálenosti poruchy při poklesu napětí na napětí v PCC při různých zkratových výkonech sítě na hladině 22kV



Graf č. 5 – Vliv kritické vzdálenosti na velikost napětí při poklesu napětí pro různé zkratové výkony sítě na hladině 22kV

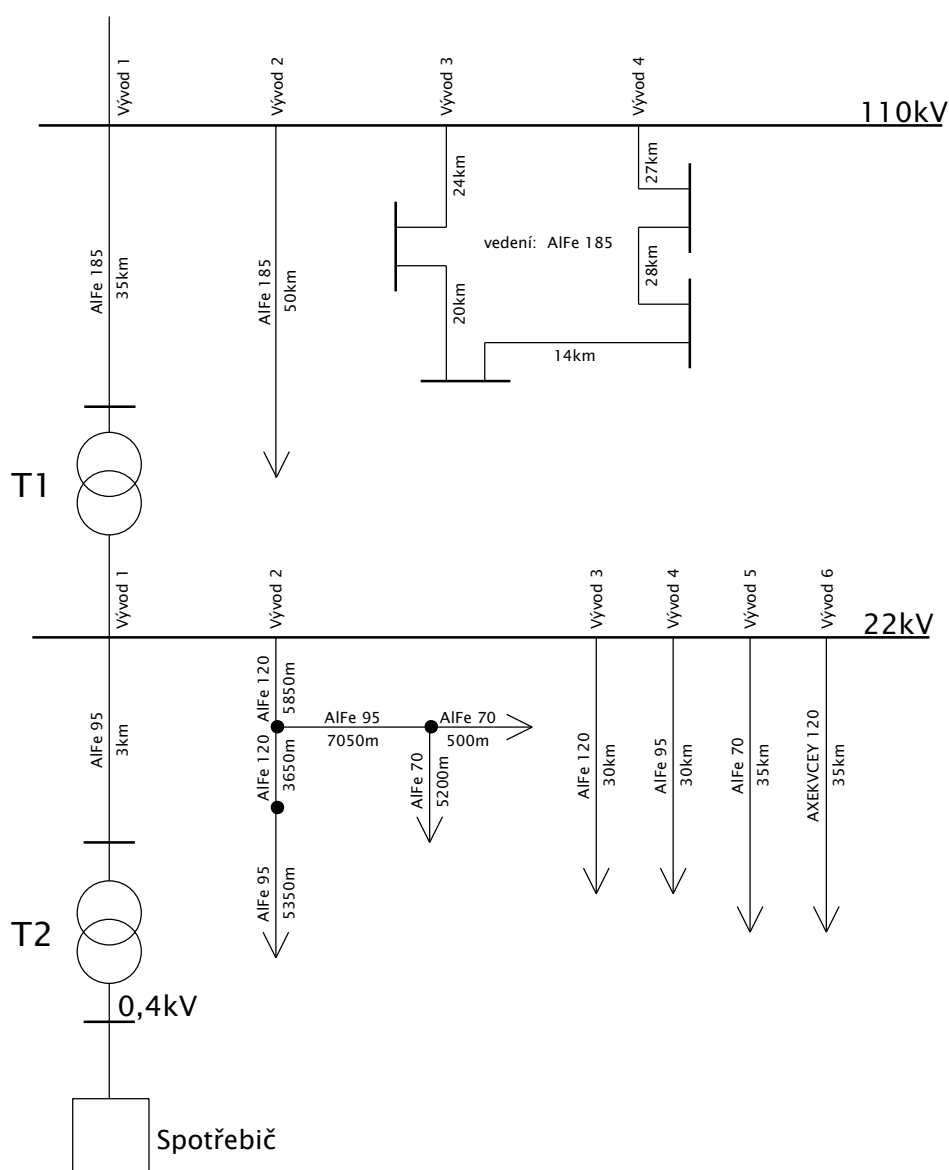


4. Stanovení kritických vzdáleností na modelu sítě

Na daném modelu sítě (Obrázek 25) je pomocí metody kritických vzdáleností stanoven průměrný roční počet poklesů napětí způsobených třífázovými poruchami pro hodnoty kritického napětí dle PPDS (tab. č. 6).

Výpočty poklesů napětí jsou prováděny na hladinách 110kV (VVN) a 22kV (VN) s uvažováním zkratového výkonu nadřazené sítě $S_k^{II} = 1250\text{MVA}$. Kompletní parametry sítě jsou součástí Přílohy A.

Obrázek 25 - Model sítě



4.1. Výpočty na hladině 110kV

Pro určení kritické vzdálenosti na jednotlivých vývodech je podle metody kritických vzdáleností uvažována impedance nadřazené sítě Z_1 (v tomto v případě vycházíme z hodnoty zkratového výkonu), která je pro všechny vývody na této hladině stejná a impedance postižené větve z_2 na 1 km vedení, ostatní vývody uvažujeme v chodu naprázdno.

Impedance Z_1 :

$$Z_S = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k^{II}} = \frac{1,1 \cdot (110 \cdot 10^3)^2}{1250 \cdot 10^6} = 10,65 \Omega$$

$$X_S = Z_S \cdot 0,995 = 10,65 \cdot 0,995 = 10,6 \Omega$$

$$R_S = \sqrt{Z_S^2 - X_S^2} = \sqrt{10,65^2 - 10,6^2} = 1,06 \Omega$$

$$\mathbf{Z_1 = 1,06 + 10,6i \Omega}$$

Vývod 2:

impedance z_2

Typ vedení a parametry:

AlFe 185mm²; délka: 50 km; $R_L = 0,156 \Omega/\text{km}$; $X_L = 0,409 \Omega/\text{km}$

$$\mathbf{z_2 = 0,156 + 0,409i \Omega/\text{km}}$$

Určení kritické vzdálenosti pro $u_{krit}=0,9$

$$l_{krit} = \frac{Z_1}{z_2} \cdot \frac{u_{krit}}{1 - u_{krit}} = \frac{1,06 + 10,6i}{0,156 + 0,409i} \cdot \frac{0,9}{1 - 0,9} = 218,9 \text{ km}$$

Pro ostatní hodnoty kritického napětí postupujeme analogicky.

Tab. č. 8 - Kritické vzdálenosti pro vývod 2 na hladině 110kV

Velikost kritického napětí	Kritická vzdálenost
90%	218,9 km
85%	137,8 km
80%	97,3 km
70%	56,76 km
40%	16,22 km
5%	1,28 km

Pozn.: Tučně zvýrazněné výsledky se týkají délky vedení vývodu 2 (110kV).

Vývody 3-4:

Jedná se o uzavřený okruh, pro který platí:

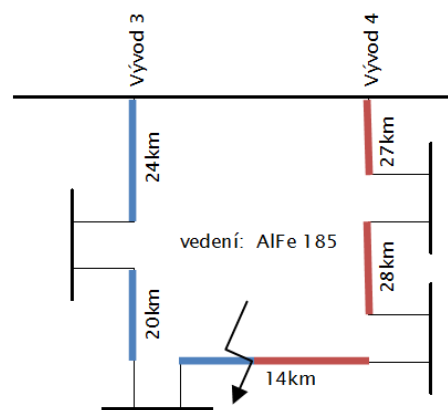
$$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B}$$

kde: Z_A je impedance vedení z vývodu 3 k místu zkratu

$$Z_A = l_A \cdot z_2$$

Z_B je impedance vedení z vývodu 4 k místu zkratu

$$Z_B = l_B \cdot z_2$$

**Typ vedení a parametry:**

AlFe 120mm²; celková délka: 111 km; $R_L = 0,156\Omega/\text{km}$; $X_L = 0,409\Omega/\text{km}$

$$z_2 = 0,156 + 0,409i \Omega/\text{km} = 0,44 \Omega/\text{km}$$

Pro určení kritické vzdálenosti je nejprve nutné spočítat impedance Z_2 pro jednotlivá kritická napětí.

Vycházíme ze vzorce:
$$u_{krit} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \rightarrow Z_2 = Z_1 \cdot \frac{u_{krit}}{1 - u_{krit}}$$

Výpočet pro $u_{krit}=0,9$:
$$Z_2 = Z_1 \cdot \frac{u_{krit}}{1 - u_{krit}} = 10,65 \cdot \frac{0,9}{1 - 0,9} = 95,83\Omega$$

Tab. č. 9 - Impedance Z_2 pro různé hodnoty kritického napětí na vývodu 3-4 (110kV)

Velikost kritického napětí	Z_2
90%	95,83Ω
85%	60,34Ω
80%	42,59Ω
70%	24,85Ω
40%	7,1Ω
5%	0,56Ω

Nejvyšší hodnotu impedance Z_2 vývodů 3-4 dostaneme, pokud zkrat nastane přesně v polovině vedení (vycházíme z paralelní kombinace Z_A a Z_B).

$$Z_{2 \max} = \frac{(55,5 \cdot z_2) \cdot (55,5 \cdot z_2)}{(55,5 \cdot z_2) + (55,5 \cdot z_2)} = \frac{(55,5 \cdot 0,44) \cdot (55,5 \cdot 0,44)}{(55,5 \cdot 0,44) + (55,5 \cdot 0,44)} = 12,15\Omega$$

Po porovnání hodnot z tabulky č. 7 a $Z_{2 \max}$ lze říci, že na vývodech 3-4 je možné najít kritickou vzdálenost pouze pro hodnotu kritického napětí $u_{\text{krit}}=0,4$ a $0,05$.

Vhodnou kombinací vzdáleností l_A a l_B lze pomocí vzorce $Z_2 = \frac{(l_A \cdot z_2) \cdot (l_B \cdot z_2)}{(l_A \cdot z_2) + (l_B \cdot z_2)}$ určit kritickou vzdálenost pro hodnoty kritického napětí $u_{\text{krit}}=0,4$ a $0,05$.

$$Z_2 = \frac{(l_A \cdot z_2) \cdot (l_B \cdot z_2)}{(l_A \cdot z_2) + (l_B \cdot z_2)} = \frac{(1,3 \cdot 0,44) \cdot (109,7 \cdot 0,44)}{(1,3 \cdot 0,44) + (109,7 \cdot 0,44)} = 0,56 \Omega$$

Tab. č. 10 - Kritické vzdálenosti pro vývod 3 a 4

l_A	l_B	Z_A	Z_B	Z_2
1,3km	109,7km	0,57 Ω	48,02 Ω	0,56 Ω
19,7km	91,3km	8,62 Ω	39,97 Ω	7,09 Ω

Pozn.: Jako kritickou vzdálenost je brána vzdálenost l_A , která je platná jak od počátku vývodu 3, tak od počátku vývodu 4, jelikož celá délka vývodů je tvořena stejným typem vedení.

4.2.Výpočty na hladině 22kV

V tomto případě je impedance Z_1 dána součtem impedancí nadřazené sítě nad 110kV, vedením mezi napěťovými hladinami a transformátorem T1 110/22kV.

Impedance Z_1

Nadřazené vedení nad 110kV

$$Z_S = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k^{II}} = \frac{1,1 \cdot (22 \cdot 10^3)^2}{1250 \cdot 10^6} = 0,426 \Omega$$

$$X_S = Z_S \cdot 0,995 = 0,43 \cdot 0,995 = 0,424 \Omega$$

$$R_S = \sqrt{Z_S^2 - X_S^2} = \sqrt{0,426^2 - 0,424^2} = 0,042 \Omega$$

$$\mathbf{Z_S = 0,042 + 0,424i \Omega}$$

Vedení mezi 110/22kV

$$X_V = l \cdot X \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 35,0,409 \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 0,57 \Omega$$

$$R_V = l \cdot R \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 35,0,156 \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3} \right)^2 = 0,22 \Omega$$

$$\mathbf{Z_V = 0,22 + 0,57i \Omega}$$

Transformátor T1

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{nT}} = \frac{9,8}{100} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{40 \cdot 10^6} = 1,19 \Omega$$

$$R_T = \Delta P_k \cdot \frac{U_n^2}{S_{nT}^2} = 86 \cdot 10^3 \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{(40 \cdot 10^6)^2} = 0,026 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{1,19^2 - 0,026^2} = 1,19 \Omega$$

$$Z_T = 0,026 + 1,19i \Omega$$

Impedance Z_1

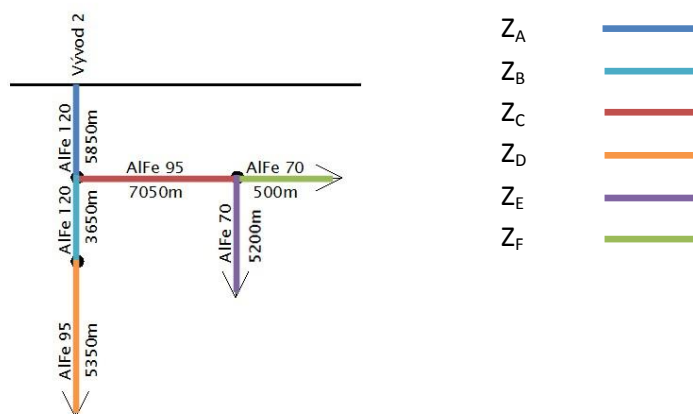
$$Z_1 = Z_S + Z_V + Z_T = 0,042 + 0,424i + 0,22 + 0,57i + 0,026 + 1,19i \\ = 0,29 + 2,18i \Omega$$

$$Z_1 = 2,2 \Omega$$

Vývod 2:

Jedná se o rozvětvený vývod s různými parametry jednotlivých částí vedení. Proto je nutné si jednotlivá vedení označit (Obrázek 26).

Obrázek 26 - označení jednotlivých vedení vývodu 2



V případě takto rozvětveného vývodu je nutné opět jako v případě vývodu 3-4 na 110kV nejprve spočítat impedanci Z_2 , kterou očekáváme při různých hodnotách kritického napětí.

Výpočet pro $u_{krit}=0,9$:
$$Z_2 = Z_1 \cdot \frac{u_{krit}}{1-u_{krit}} = 2,2 \cdot \frac{0,9}{1-0,9} = 19,8 \Omega$$

Tab. č. 11- Impedance Z_2 pro různé hodnoty kritického napětí na vývodu 2 (22kV)

Velikost kritického napětí	Z_2
90%	19,8 Ω
85%	12,47 Ω
80%	8,8 Ω
70%	5,13 Ω
40%	1,47 Ω
5%	0,12 Ω

Pro jednotlivá vedení byla spočtena impedance na celou jejich délku.

Impedance Z_A :

$$X_A = l \cdot X = 5,85 \cdot 0,356 = 2,08 \Omega$$

$$R_A = l \cdot R = 5,85 \cdot 0,245 = 1,43 \Omega$$

$$Z_A = R_A + X_A = 1,43 + 2,08i = 2,53 \Omega$$

Impedance pro ostatní vedení se počítá analogicky. Parametry jednotlivých vedení jsou uvedeny v příloze.

Tab. č. 12 - Impedance jednotlivých vedení vývodu 2 (22kV)

Druh vedení	Z_2
Z_A	2,53 Ω
Z_B	1,58 Ω
Z_C	3,36 Ω
Z_D	2,55 Ω
Z_E	2,99 Ω
Z_F	0,29 Ω

Nyní lze jednoduše určit celkovou impedanci jednotlivých větví, poskládanou z předchozích výsledků:

Tab. č. 13 - Celková impedance jednotlivých větví vývodu 2 (22kV)

Druh vedení	Z_2
$Z_A + Z_B + Z_D$	6,66 Ω
$Z_A + Z_C + Z_E$	8,79 Ω
$Z_A + Z_C + Z_F$	6,18 Ω

Po porovnání tabulky č.11 s tabulkou č.9 je jednoznačné, že se v celém tomto vývodu dostaneme pouze na hodnotu kritického napětí $u_{krit}=0,8$ ($Z_2=8,8\Omega$, $Z_A+Z_C+Z_E=8,79\Omega$).

Výpočet kritické vzdálenosti pro $u_{krit}=0,8$

Z předchozích údajů je zřejmé, že pokles bude způsoben poruchou na vedení Z_E .

$$l_{krit} = \left(\frac{l_{Z_E}}{Z_E} \cdot (Z_2 - Z_A - Z_C) \right) + l_{Z_A} + l_{Z_C} = \left(\frac{5,2}{2,99} \cdot (8,8 - 2,52 - 3,36) \right) + 5,85 + 7,05$$

$$= 17,96 \text{ km}$$

Obdobně postupujeme pro $u_{krit}=0,7$; 0,4; 0,05

Tab. č. 14 - Kritické vzdálenosti pro vývod 2 (22kV)

u_{krit}	l_{krit}		Druh vedení
80%	17,96	km	$Z_A+Z_C+Z_E$
70%	11,66	km	$Z_A+Z_B+Z_D$
70%	11,32	km	Z_A+Z_C
40%	3,39	km	Z_A
5%	0,27	km	Z_A

Vývod 3:

impedance z_2

Typ vedení a parametry:

AlFe 120mm²; délka: 30 km; $R_L = 0,245\Omega/\text{km}$; $X_L = 0,356\Omega/\text{km}$

$$z_2 = 0,245 + 0,356i \Omega/\text{km}$$

Určení kritické vzdálenosti pro $u_{krit}=0,9$

$$l_{krit} = \frac{Z_1}{z_2} \cdot \frac{u_{krit}}{1 - u_{krit}} = \frac{0,29 + 2,18i}{0,245 + 0,356i} \cdot \frac{0,9}{1 - 0,9} = 45,83 \text{ km}$$

Pro ostatní hodnoty kritického napětí postupujeme analogicky.

Tab. č. 15 - Kritické vzdálenosti pro vývod 3 na hladině 22kV

Velikost kritického napětí	Kritická vzdálenost
90%	45,83 km
85%	28,86 km
80%	20,37 km
70%	11,88 km
40%	3,39 km
5%	0,27 km

Pozn.: Tučně zvýrazněné výsledky se týkají délky vedení vývodu 3 (22kV).

Vývody 4,5 a 6:

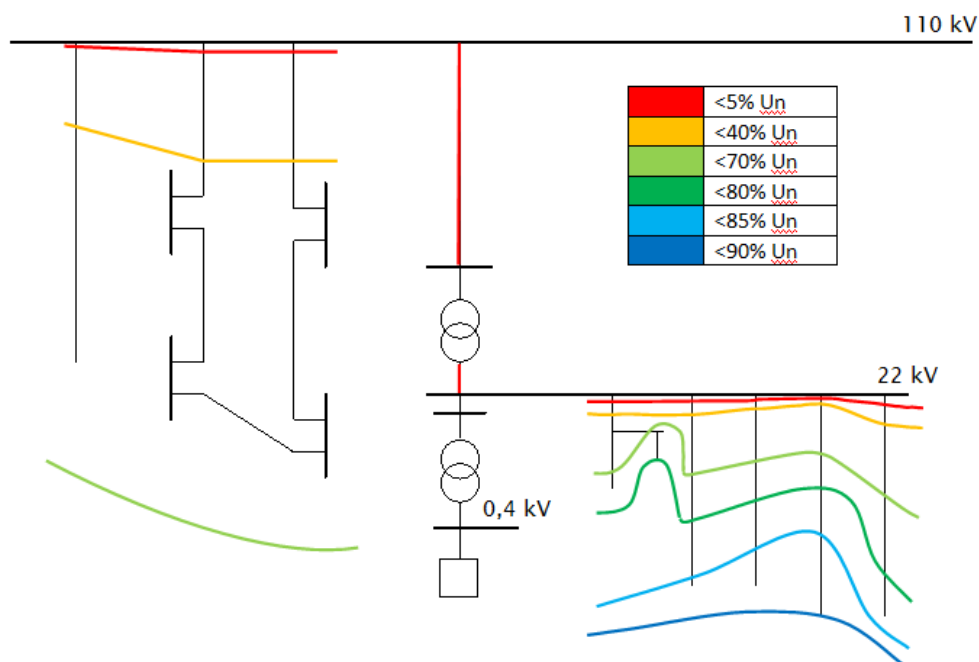
jsou spočítány stejným způsobem jako vývod 2.

Tab. č. 16 - Kritické vzdálenosti pro vývody 4, 5 a 6 na hladině 22kV

Velikost kritického napětí	Kritická vzdálenost Vývod 4	Kritická vzdálenost Vývod 5	Kritická vzdálenost Vývod 6
90%	41,52 km	34,41 km	63 km
85%	26,15 km	21,67 km	39,67 km
80%	18,46 km	15,29 km	28 km
70%	10,77 km	8,92 km	16,33 km
40%	3,08 km	2,55 km	4,67 km
5%	0,24 km	0,2 km	0,37 km

Pozn.: Tučně zvýrazněné výsledky se týkají délky jednotlivých vedení.

Nyní lze z vypočtených kritických vzdáleností pro celou síť stanovit oblast ohrožení.

Obrázek 27 - Oblast ohrožení pro modelovou síť (délky vedení jsou ve shodném měřítku)

Z tohoto modelu je patrné, že s větším průřezem vedení se zvětšuje kritická vzdálenost. Horší parametry stejně tak vykazují kabelová vedení v porovnání s venkovními o stejných průřezech, kde u kabelových vedení je kritická vzdálenost výrazně větší.

4.3. Stanovení počtu poklesů

Pomocí dat o poruchovosti jednotlivých vedení a výsledných kritických vzdáleností, lze vyčíslit počty poklesů napětí pod určené hodnoty kritického napětí.

Poruchovost vedení na VN:

Pro určení počtu poklesů pod 90% na této hladině, je nejprve nutné vyčíslit celkovou délku vedení, na které případná porucha způsobí pokles napětí právě pod tuto hodnotu. Do této délky je také započítávána porucha na vývodu 1, která způsobí přímé přerušení dodávky elektrické energie k odběrateli. Výpočty pro poklesy pod hranici 85%, 80%, 70%, 40% a 5% probíhají obdobně.

Tab. č. 17 - Celková délka vedení na které porucha způsobí pokles pod 90% jmenovitého napětí

Vývod	Kritická vzdálenost pro $u_{krit} < 90\%$
1	3 km
2	27,6 km
3	30 km
4	30 km
5	34,41 km
6	35 km
Celková kritická vzdálenost	160,01 km

Pro určení počtu poklesů vycházíme ze statických hodnot poruchovosti vedení naměřených na hladinách VN. Poruchovost takového vedení je $\lambda=7,5$ poruchy na 100 km za rok.

$$\text{počet poruch} = l_{krit\ celk} \cdot \frac{\lambda}{100} = 160,01 \cdot \frac{7,5}{100} = 12 \text{ za rok}$$

Stejným způsobem se postupuje pro ostatní hladiny poklesů napětí.

Tab. č. 18 - Počet poklesů napětí pod danou úroveň na hladině VN

Úroveň poklesu	Celková kritická vzdálenost	Počet poklesů za rok
<90%	160,01km	12
<85%	142,27km	10,67
<80%	112,58km	8,44
<70%	68,03km	5,1
<40%	20,08km	1,51
<5%	4,35km	0,33

Poruchovost na VVN:

Výpočet je obdobný jako na hladině VN. Poruchovost je v tomto případě určena průměrnou hodnotou počtu poruch pro jednotlivá vedení na celé části VVN. Data jednotlivých vedení poskytují informace z let 2002 až 2009 a postup jejich zpracování je součástí přílohy B.

Výsledná poruchovost na VVN: 10,9 poruchy/rok/100km

Tab. č. 19 - Počet poklesů napětí pod danou úroveň na hladině VVN

Úroveň poklesu	Celková kritická vzdálenost	Počet poklesů za rok
<90%	196 km	21,4
<85%	196 km	21,4
<80%	196 km	21,4
<70%	196 km	21,4
<40%	90,62 km	9,9
<5%	38,88 km	4,2

Celá síť:

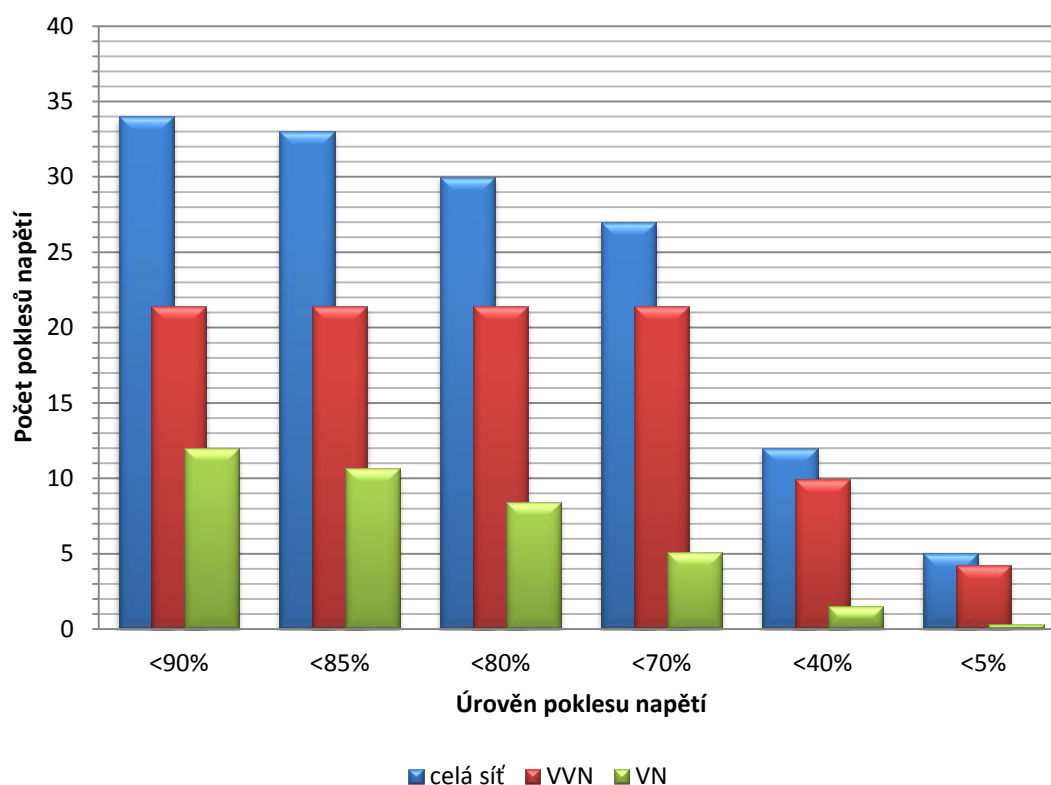
Celkový počet poklesů napětí pro celou síť je dán součtem poklesů na hladinách VN a VVN zaokrouhlených směrem nahoru.

Tab. č. 20 - Počet poklesů napětí pro jednotlivé poklesové hladiny v celé síti

Úroveň poklesu	Počet poklesů za rok
<90%	34
<85%	33
<80%	30
<70%	27
<40%	12
<5%	5

Výsledná data lze přehledně zpracovat pomocí histogramu (graf č.6). V histogramu jsou zobrazeny jak výsledné počty poklesů napětí, tak hodnoty pro jednotlivé napěťové hladiny sítě.

Graf č. 6 - Počet poklesů napětí na modelové síti pro dané úrovně za 1 rok



Z výsledného histogramu lze určit kolik poklesů napětí je způsobeno poruchami v síti VN a VVN. V tomto případě budou spotřebiči činit častěji problémy poruchy způsobené v síti VVN. Za jeden rok lze očekávat až 5 poruch, které způsobí pokles napětí pod hladinu 5% a dojde tedy, dle normy ČSN EN 50 160, k přerušení dodávky elektrické energie.

Závěr

Poklesy napětí, na které je tato diplomová práce zaměřena, jsou v dnešní době čím dál častěji diskutovány, protože činní velké ekonomické a výrobní problémy společnostem, které ve výrobě využívají zařízení na tento jev citlivá. Příkladem mohou být papírny, ve kterých pokles napětí může způsobit změnu tloušťky vyráběného papíru, což je nežádoucí a má za následek ekonomické ztráty.

Teoretická část se nejprve věnuje problematice kvality elektrické energie, do které poklesy napětí, jakožto jev kvalitu ovlivňující, řadíme. Poklesy napětí mohou mít různé parametry, liší se např. způsobem vzniku. Nejčastěji se jedná o hlubší pokles s kratší dobou trvání, který bývá způsoben poruchou v síti. Způsob šíření poklesu napětí je dán parametry sítě, obecně lze však říci, že s větší vzdáleností od místa vzniku účinek poklesu napětí klesá.

Mezi zařízení citlivá na poklesy napětí řadíme např. stykače, které jsou často označovány jako slabé články v mnoha procesech, jelikož mohou považovat pokles napětí za přerušení, což vede v některých případech např. k nechtěnému přerušení výroby. Dalšími zařízeními jsou řízené pohony, osobní počítače, svítidla atd. Aby byli společnosti schopny předcházet nežádoucím ztrátám, existují metody výpočtů poklesů napětí, pomocí kterých, lze stanovit jakým způsobem se k tomuto problému postavit.

Těmto výpočtům se věnuje praktická část práce. Jedná se o aplikaci metody kritických vzdáleností na modelový případ sítě. Z výsledků jsme pak schopni určit jak oblast ohrožení, tak počet jednotlivých poklesů napětí. Pokud spojíme výsledky výpočtů a např. toleranční křivky pro střídavý stykač z teoretické části (obrázek 7) a uvažujeme horní mez kritického napětí 70% U_n , došlo by v případě připojení stykače do místa spotřebiče v této síti ročně k 27 poklesům (z toho 22 způsobených na síti VVN a 5 na VN), které by způsobovaly nefunkčnost zařízení. Pokud tedy víme, kolik poklesů napětí ročně vzniká, lze snadno vyčíslit ekonomické ztráty a rozhodnou se, zdali je vhodné investovat do nápravného zařízení, které tyto jevy minimalizuje nebo úplně potlačí. Jedná se např. o setrvačníky, zdroje nepřerušitelného napájení UPS, dynamické regulátory napětí DVR, nebo záložní vedení a generátory. Cena takovýchto zařízení je poměrně vysoká a právě tyto výpočty usnadňují společnostem rozhodování, zdali je tato investice pro jejich výrobu ekonomicky i provozně vhodná.

Seznam literatury

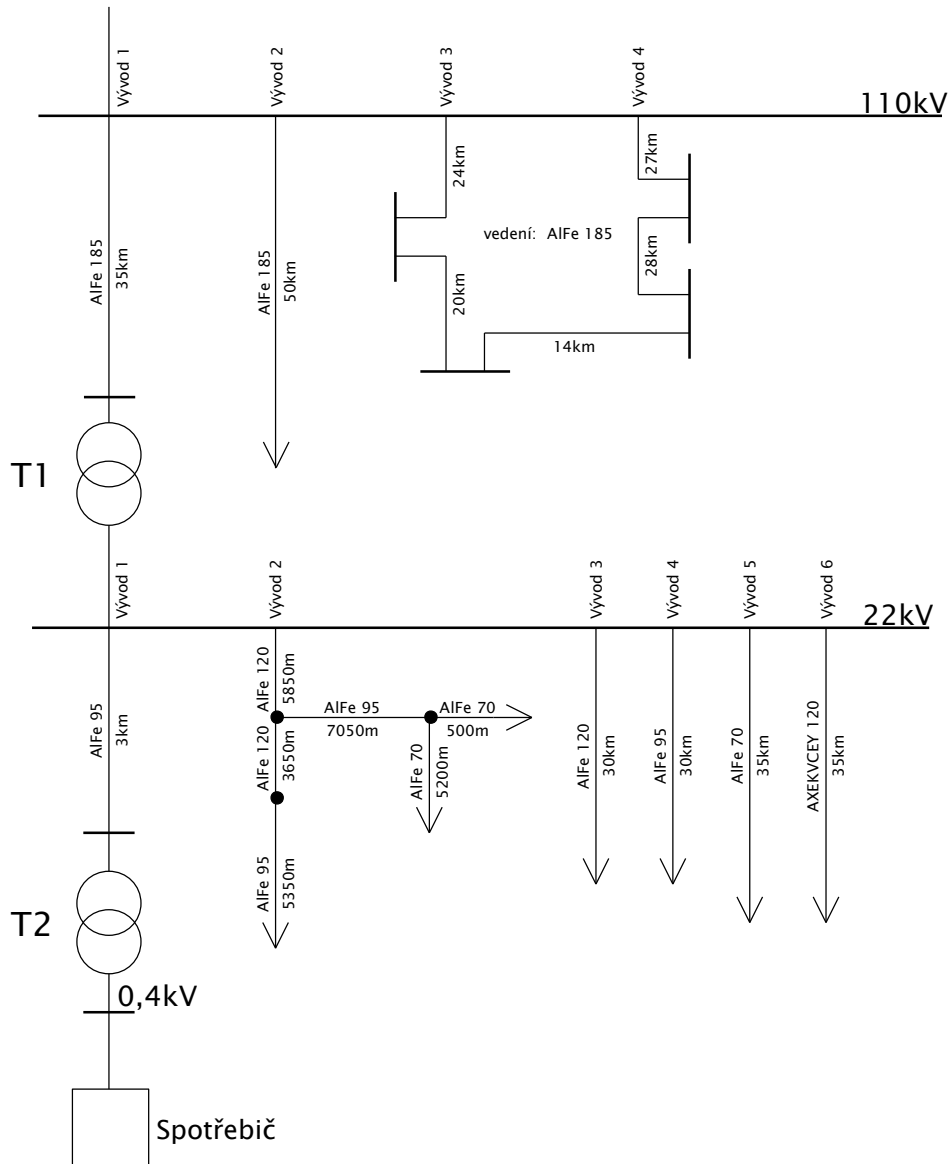
- [1] DUGAN, Roger C. *Electrical power systems quality*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2003, xv, 528 p. ISBN 00-713-8622-X.
- [2] ČSN EN 50 160. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [3] TESAŘOVÁ, M.: *Výpočtové metody pro predikci poklesů napětí*, Plzeň, ZČU, 2006
- [4] SANKARAN, C. *Power quality*. Boca Raton: CRC Press, c2002, 202 p. ISBN 08-493-1040-7.
- [5] Pravidla provozování distribučních soustav: Kvalita elektřiny v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení. In: [online]. [cit. 2013-01-28]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds06-3-priloha.pdf>
- [6] ŠMÍD, Jaroslav. Stanovení mezních hodnot rušivých vlivů ve veřejných distribučních sítích v návaznosti na české a mezinárodní normy se zaměřením na poklesy a přerušení napětí. In: [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~san50/Ceska/GACR/Poklesy_a_preruseni_napeti1.doc
- [7] PNE 33 3430-4. Parametry kvality elektrické energie – Část 4: Poklesy a krátká přerušení napětí. 2. vyd. Praha: ÚJV Řež, a. s. – EGP Praha, 2007.
- [8] TESAŘOVÁ, Miloslava. STANOVENÍ ČETNOSTI KRÁTKODOBÝCH POKLESŮ NAPĚTÍ. 2002. vyd.
- [9] DAVID CHAPMAN. *Power quality application guide: Voltage Dips. Introduction*. Brussels: European Copper Institute and Copper Development Association, 2001. Dostupné z: <http://www.copperinfo.co.uk/power-quality/downloads/pqug/51-voltage-dips.pdf>
- [10] [CIGRÉ], Working group C4. *Voltage dip immunity of equipment and installations*. Paris: CIGRÉ, 2010. ISBN 978-285-8730-995.

- [11] ŠVINDRYCH, Jan. *HODNOCENÍ NAPĚŤOVÝCH UDÁLOSTÍ S OHLEDEM NA ODOLNOST SPOTŘEBIČŮ*. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/svindrych.pdf>. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií: Ústav elektroenergetiky.
- [12] VÍT, M. Odolnost různých konstrukcí počítačových napájecích zdrojů na poklesy a krátkodobé výpadky napětí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 81 s.
- [13] DJOKIĆ, Saša Ž., Jovica V. MILANOVIĆ a Daniel S. KIRSCHEN. Sensitivity of AC Coil Contactors to Voltage Sags, Short Interruptions, and Undervoltage Transients. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*. July 2004, VOL. 19, NO. 3.
- [14] DJOKIĆ, S. Ž., K. STOCKMAN, J. V. MILANOVIĆ, J. J. M. DESMET a BELMANS. Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags and Short Interruptions. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*. JANUARY 2005, VOL. 20, NO. 1.
- [15] DJOKIĆ, S. Ž., K. STOCKMAN, J. V. MILANOVIĆ, J. DESMET a G. VANALME. Sensitivity of Personal Computers to Voltage Sags and Short Interruptions. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*. JANUARY 2005, VOL. 20, NO. 1.
- [16] ANDERSSON, Thomas a Daniel NILSSON. *Test and evaluation of voltage dip immunity*. Vattenfall Sveanät, Åke Ceder: Chalmers, Inst. Elteknik, Jaap Daalder, 2002.
- [17] POHJANHEIMO, Pasi. A probabilistic method for comprehensive voltage sag management in power distribution systems. Espoo: Helsinki University of Technology, 2003. ISBN 95-122-6399-8.
- [18] BRADLEY, David. *Voltage Dips: Predictive Maintenance – The Key to Power Quality*. Rhopoint Systems Ltd, 2001. Dostupné z: <http://www.copperinfo.co.uk/power-quality/downloads/pqug/521-predictive-maintenance-key-to-power-quality.pdf>
- [19] MARTÍNEZ-VELASCO, Juan A. Computer-Based Voltage Dip Assessment in Transmission and Distribution Networks. *Electrical Power Quality and Utilisation*. 2008, Vol. XIV, No 1

- [20] TESAŘOVÁ, Miloslava. *MATEMATICKÝ MODEL PRO POSOUZENÍ KVALITY SÍTĚ Z HLEDISKA POSTPORUCHOVÝCH NAPĚŤOVÝCH POMĚRŮ*. Plzeň, 2004. Výzkumná zpráva. ZČU
- [21] Trojánek, Z.- *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*, ČVUT Praha, 1984
- [22] OLGUIN, GABRIEL. *Stochastic Assessment of Voltage Dips Caused by Faults in Large Transmission System*. Göteborg, Sweden, 2003. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- [23] BOLLEN, Mathias H J. Method of critical distances for stochastic assessment of voltage sags. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*. London: The Institution of Electrical Engineers, 1998. ISSN 1350-2360.
- [24] BOLLEN, Mathias H J. Fast assessment methods for voltage sags in distribution systems. *IEEE transactions on industry applications*. 1996. ISSN 0093-9994.

Příloha A

Ucelené zadání modelu sítě



Parametry sítě

Nadřazená síť:

$$S_k^{II} = 1250 \text{ MVA}$$

Hladina 110kV:

Jednotlivá vedení:

Vývod	Druh vedení	Délka	R	X
1	AlFe 185mm ²	35 km	0,156 Ω/km	0,409 Ω/km
2	AlFe 185mm ²	50 km	0,156 Ω/km	0,409 Ω/km
3-4	AlFe 185mm ²	111 km	0,156 Ω/km	0,409 Ω/km

Transformátor T1 110/22kV:

$$S_{nT} = 40 \text{ MVA}$$

$$u_k = 9,8\%$$

$$\Delta P_k = 86 \text{ kW}$$

Hladina 22kV:**Jednotlivá vedení:**

Vývod	Druh vedení	Délka	R	X
1	AlFe 95 mm ²	3 km	0,301 Ω/km	0,37 Ω/km
2	AlFe 120 mm ²	5,85 km	0,245 Ω/km	0,356 Ω/km
	AlFe 120 mm ²	3,65 km	0,245 Ω/km	0,356 Ω/km
	AlFe 95 mm ²	7,05 km	0,301 Ω/km	0,37 Ω/km
	AlFe 95 mm ²	5,35 km	0,301 Ω/km	0,37 Ω/km
	AlFe 70 mm ²	5,2 km	0,431 Ω/km	0,378 Ω/km
	AlFe 70 mm ²	0,5 km	0,431 Ω/km	0,378 Ω/km
3	AlFe 120mm ²	30 km	0,245 Ω/km	0,356 Ω/km
4	AlFe 95 mm ²	30 km	0,301 Ω/km	0,37 Ω/km
5	AlFe 70 mm ²	35 km	0,431 Ω/km	0,378 Ω/km
6	AXEKVCEY 120 mm ²	35 km	0,299 Ω/km	0,097 Ω/km

Transformátor T2 22/0,4kV

$$S_{nT} = 400\text{kVA}$$

$$u_k = 6\%$$

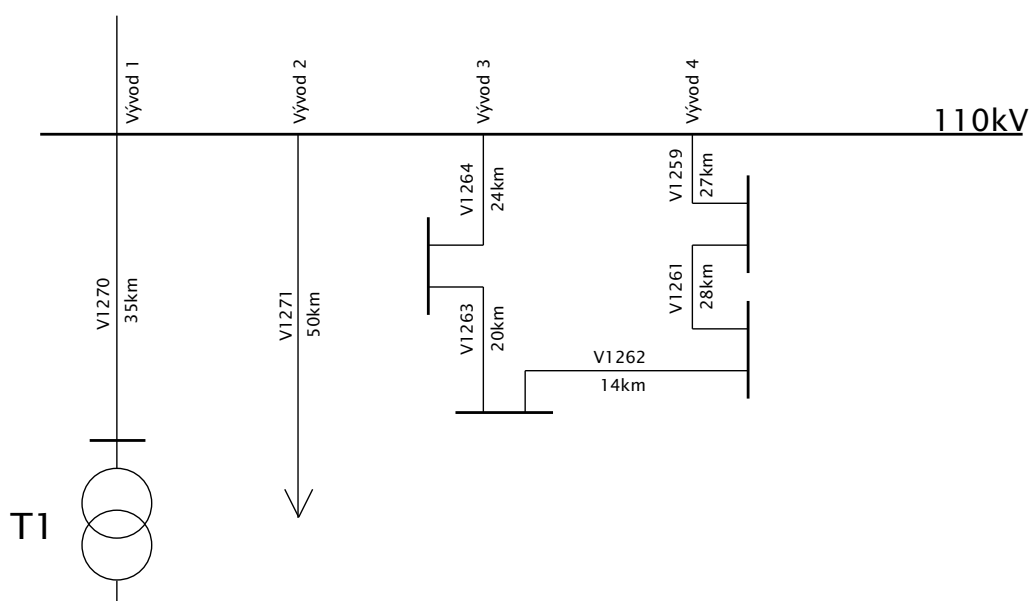
$$\Delta P_k = 4,6\text{kW}$$

Příloha B

Poruchovost vedení na VVN

K určení poruchovosti na vedeních VVN bylo využito reálných dat. Délky vedení byly navrženy tak, aby odpovídaly těm, pro která bylo možné získat počet OZ za jednotlivé roky. Na obrázku č. 1 jsou jednotlivá vedení označena a tabulka č.1 uvádí počet jednotlivých OZ v průběhu let 2002 až 2009.

Obrázek 1 - Označení jednotlivých vedení VVN



Tabulka 1 - Reakce OZ na vedeních z let 2002 - 2009

Vedení	Rok								Suma
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
V1270	1	0	2	1	0	0	0	2	6
V1271	4	3	5	1	6	8	4	9	40
V1264	3	2	4	0	0	1	1	0	11
V1263	0	5	2	5	1	6	3	4	26
V1262	4	3	9	3	1	4	1	3	28
V1261	1	0	3	5	2	3	0	2	16
V1259	3	1	2	7	2	1	0	6	22

Abychom dostali poruchovost jednotlivých vedení na jeden kilometr je potřeba celkový počet reakcí OZ podělit délkou jednotlivých vedení.

Tab. č. 2 - Počet poruch na jednotlivých vedení na 1 km za 1 rok

Vedení	Reakce OZ za rok	Délka [km]	Poruch na 1km za rok
V1270	6	35	0,021
V1271	40	50	0,1
V1264	11	24	0,057
V1263	26	20	0,16
V1262	28	14	0,24
V1261	16	28	0,07
V1259	22	27	0,102
λ celkem			0,76

Výslednou průměrnou poruchovost vedení VVN dostaneme podělením celkového počtu poruch za jeden rok na jeden kilometr počtem vedení.

$$\lambda = \frac{\lambda_{celkem}}{7} = \frac{0,76}{7} = 0,109 \text{ poruch/rok/km}$$

Poruchovost vedení za rok na 100km:

$$\lambda = 10,9$$