# 1 Elektrická kritéria projektu

Elektrická vedení se dělí na venkovní a kabelová. Obě slouží ke společnému účelu - přenosu elektrické energie. Volba jednoho nebo druhého způsobu přenosu je prvním aspektem projektu, který je nutné vzít v úvahu, a vychází ze zcela konkrétních požadavků daných specifickými místními podmínkami. Následující kapitola stručně shrnuje jejich výhody a nevýhody.

## 1.1 Vlastnosti venkovních a kabelových vedení

1. <u>Venkovní vedení</u>

- Sestávají z holých vodičů - drátů nebo lan (popřípadě ze závěsných kabelů nebo z jednoduchých izolovaných vodičů), ze stožárů, izolátorů a dalšího příslušenství.
- Zcela výsadní postavení mají v sítích 400 a 220 kV, převažují v sítích 110 kV a ve venkovních sítích vn.
- Mají vyšší indukčnost a menší kapacitu než kabelová vedení.
- Lépe se ochlazují.
- Na stejné vzdálenosti a při stejném průřezu mají větší úbytek napětí v porovnání s kabelovými vedeními.
- Jsou náchylnější na působení povětrnostních vlivů, obecně jsou poruchovější, ale většina poruch má přechodný charakter.
- Vyhledávání poruch je jednoduché.
- Jsou levnější než kabely.
- Podílejí se na spoluvytváření architektury krajiny.

2. <u>Kabelová vedení</u>

- Sestávají z kabelů, které mohou být různého provedení, jež může částečně ovlivňovat elektrické vlastností vedení. Provedení izolace a konstrukce kabelů umožňuje různé způsoby uložení a využití v prostředích různorodých vlivů.
- Používají se v městských a průmyslových sítích v rozvodech vn, ve velkých aglomeracích se používají i pro rozvody 110 kV.
- Mají menší indukčnost a větší kapacitu než venkovní vedení.
- Odvod tepla je závislý na mnoha faktorech, obecně mají kabelová vedení horší chlazení než venkovní vedení.
- Jsou méně poruchová než venkovní vedení, ale poruchy jsou trvalé.
- Vyhledávání poruch je komplikovanější.
- Jsou dražší.
- V hotovém provedení nenarušují ráz krajiny.

## 1.2 Vodiče

### 1.2.1 Materiály

Materiály používané na vodiče musí být voleny tak, aby splňovaly elektrické vlastnosti (rezistivitu, teplotní odporový činitel) a mechanické vlastnosti (pevnost, modul pružnosti, koeficient tepelné roztažnosti) definované navrhovanými parametry vedení. Přitom musí být brán zřetel na odolnost proti únavě materiálu a jeho životnost. Výrobce musí uvést nejvyšší provozní teploty vodičů při různých provozních podmínkách a zejména nejvyšší provozní teplotu při normálním zatížení, nejvyšší krátkodobou teplotu po stanovenou dobu při různém zatížení vodičů nad běžnou úroveň a nejvyšší teplotu při specifikované poruše. Pro vodiče se používají tyto materiály:

- ***Vodiče na bázi hliníku* (Al) -** vodiče jsou vyrobeny z kruhových nebo tvarovaných drátů z hliníku nebo slitiny hliníků (Ald) a pro zesílení mohou obsahovat pozinkované ocelové dráty nebo ocelové dráty oplátované hliníkem. V porovnání s mědí je rezistivita hliníku přibližně 1,6krát větší, měrná hmotnost je jen 0,3 hmotnosti mědi a délková roztažnost je 1,4krát větší. Pevnost v tahu hliníkového vodiče je malá - 180 MPa, proto se u lan kombinuje s železem (AlFe). Na vzduchu je hliník stálý, odolný proti povětrnostním vlivům.

- ***Vodiče na bázi oceli* (Fe)** - používá se ocel Fe35, Fe55, Fe70, Fe100, Fe130 s pevností v tahu 350, 550, 700, 1000, 1300 MPa. Protože ocel na vzduchu koroduje, používá se ocel pozinkovaná. Není vhodná pro elektrovodné účely, proto se nepoužívá na vodiče kabelů. Hlavní použití je pro zemnicí lana, kotevní lana a nosné částí kombinovaných lan.

- ***Vodiče na bázi mědi* (Cu)** - používá se měď tvrdá s pevností v tahu 400 MPa a měď polotvrdá s pevností v tahu 300 MPa. Její použití je omezeno na vedení nn a vn. Bronzové vodiče (měď + cín) mají větší pevnost v tahu (500 - 700 MPa) než samotná měď a jejich rezistivita se pohybuje mezi 22 - 130 [$\Omega mm^2/km$] v závislosti na obsahu mědi.

Výrobci ve firemní dokumentaci rovněž uvádějí rezistivitu jádra vodiče [Ω/km], indukční reaktanci [Ω/km] při dané teplotě a u kabelů navíc nejmenší izolační odpor [MΩ/km].

Ocelové vodiče mohou být chráněny proti korozi mazivem. Pro napětí vyšší než 100 kV nesmí být mazivo použito na vnější vrstvu drátů lana. Vlastnosti maziva nesmějí umožňovat jeho průnik na povrch vodiče po dobu jeho provozní životnosti [10], [20].

### 1.2.2 Konstrukce

1. <u>Vodiče pro venkovní vedení</u>

Vodiče jsou nejdůležitější částí venkovního vedení. Na jejich volbě závisí nejen elektrické vlastnosti vedení, jako je úbytek napětí, ztráty energie, rušení, stabilita, zkratové poměry apod., ale také volba stožárů, základů, provozní bezpečnost (protože přetrhnutí vodiče vyvolá velkou poruchu dodávky a může způsobit požár, smrt nebo zřícení několik kilometrů dlouhého vedení zatíženého jednostranným tahem), investiční náklady vedení apod.

Na vodiče jsou kladeny požadavky často protichůdné, například:

- malá hmotnost z hlediska dopravy a zatížení stožárů, ale velká z hlediska vychylování větrem;
- velký průměr z důvodu ztrát korónou a rušení, ale malý průměr vzhledem k námraze a tlaku větru;
- malá rezistance;
- velká pevnost;
- odolnost proti chemickým vlivům prostředí;
- odolnost proti kmitání;
- odolnost proti poškození při montáži;
- malé pořizovací náklady.

Podle konstrukce se vodiče dělí na:

- ***Dráty*** **-** používají se jen pro vedení do 1 kV. Materiálem může být Cu, Ald, Fe, přičemž užití hliníku je omezeno pouze pro závěsné kabely. Rovněž je omezen průřez vodičů, pro Cu je to 6 - 25 $mm^2$, pro Ald 16 - 25 $mm^2$ a pro Fe 10 - 20 $mm^2$ [8].

- ***Lana prostá*** - vodiče složené z většího počtu drátů ze stejného materiálu, tj. jednoduchých vodičů kruhového průřezu. Dráty jsou pravidelně stočeny do vrstev kolem přímo nataženého osového drátu. Zákruty sousedních vrstev mají různé délky a jsou opačného smyslu. Vnější vrstva lana musí být pravotočivá, tj. musí mít pravý závit z důvodu natáčení lana na buben.

  Dráty zkroucené do šroubovice jsou delší o 2 až 3 % než drát osový a než drát ve spodní poloze, což má vliv na celkovou váhu lana a na elektrický odpor. Přibližný průměr lana lze určit pomocí vztahu:

  $$d = 1{,}3 \cdot \sqrt{S} \qquad [mm;\ mm^2] \qquad [20]$$

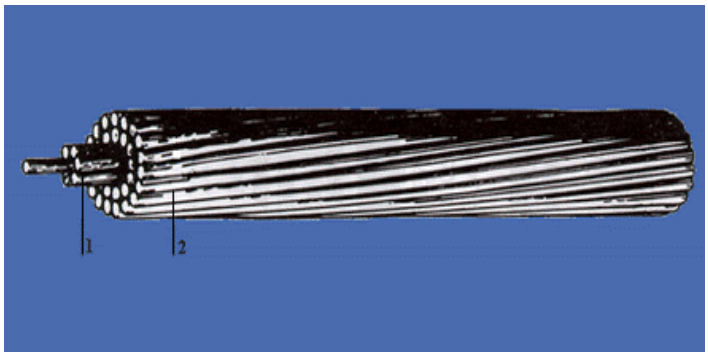
  S matematický průřez lana

  U lan rozlišujeme tři charakteristiky průřezů:

  - jmenovitý, tj. zaokrouhlený průřez elektrovodné části lana;
  - matematický, tj. součet průřezů všech drátů lana (rozhoduje při mechanických výpočtech);
  - elektrický, tj. průřez plného vodiče se stejnou rezistancí.

  Lana prostá mohou být vyrobena z mědi, bronzu, hliníku a jeho slitin nebo oceli. Lano je v provozu ohebnější a bezpečnější než drát. Má větší hmotnost a elektrický odpor, ale má menší pevnost, modul pružnosti v tahu a indukčnost než plný drát stejného průřezu [20].

- ***Lana kombinovaná*** - jsou zhotovena ze dvou materiálů. Ve většině případů se jedná o hliník (případně jeho slitiny) a ocel. Ocelová duše, která se vyznačuje velkou mechanickou pevností, přenáší hlavní mechanické namáhání vznikající mechanickým napětím vodiče. Duše je opletena hliníkovými dráty, které slouží jako elektrovodná část lana. Mají větší průměr než hliníková lana prostá stejné vodivosti, takže zmenšují ztráty korónou.




Obr. 12: Řez AlFe lanem. *1*- ocelová duše, *2* - hliníkový plášť

Hliníková lana s ocelovou duší se označují průřezem hliníku , značkou AlFe a číslem, které je zaokrouhleným poměrem průřezu hliníku k průřezu železa. Např. 120 AlFe 6 je hliníkové lano s ocelovou duší, které má průřez hliníku 120 a průřez oceli 20 $mm^2$. Nejčastějšími typy lan jsou AlFe 6 a AlFe 4, dále se vyrábějí lana AlFe 3 a AlFe 8. Čím menší je poměr průřezu hliníku a železa, tím je lano pevnější a má větší průměr. Pro venkovní vedení vvn s maximálním rozpětím 100 m se používají lana typu AlFe 6. Lana typu AlFe 4 se užívají jen ve výjimečných případech, kdy je nutno překonávat velká rozpětí (600 až 1000 m) při přechodech přes údolí, řeky apod. nebo pro oblasti s velkou námrazou .

Materiálem budoucnosti, který se jinde ve světě v energetikách osvědčil, je speciální vodič na holé vedení vn a vvn označovaný zkratkou ACCR, který umožňuje minimálně dvakrát zvýšit přenosovou kapacitu stávajícího vedení bez výměny stožárů a izolátorů. Řeší se jím rovněž ty trasy vedení, kde jsou při využití AlFe lan problémy s průvěsem nebo s velikou vzdáleností stožárů nebo nelze-li přidat další vedení z důvodu ochrany krajiny. Konstrukce vodiče je tvořena drátky v jádře, které mají velkou mechanickou pevnost, a obvodovými drátky, které mají při podstatně menší hmotnosti větší vodivost. Pevnost vytvářejí podélně orientovaná keramická mikrovlákna zalitá v matrici z čistého hliníku. Obvodové drátky jsou ze slitiny hliník-zirkonium s vodivostí blízkou hliníku, ale s podstatně větší teplotní odolností

- *Svazkové vodiče* - jedna fáze vedení je tvořena jednotným geometrickým uspořádáním dvou a více paralelních vodičů. Vodiče svazku jsou navzájem vzdáleny 25 - 60 cm a jsou spojeny po určitých vzdálenostech kovovými rozpěrkami. Při výpočtu parametrů vedení je nutné dosazovat za poloměr vodiče tzv. účinný neboli ekvivalentní poloměr svazku $r_e$. Další vlastností svazkových vodičů je zmenšení podélné indukčnosti vedení asi o 15 %, zvětšení provozní (příčné) kapacity, zvětšení proudové zatížitelnosti vedení, zmenšení náchylnosti ke kmitání, zvětšení přídavného zatížení námrazou a větrem, zvětšení investičních nákladů a montážní náročnosti .

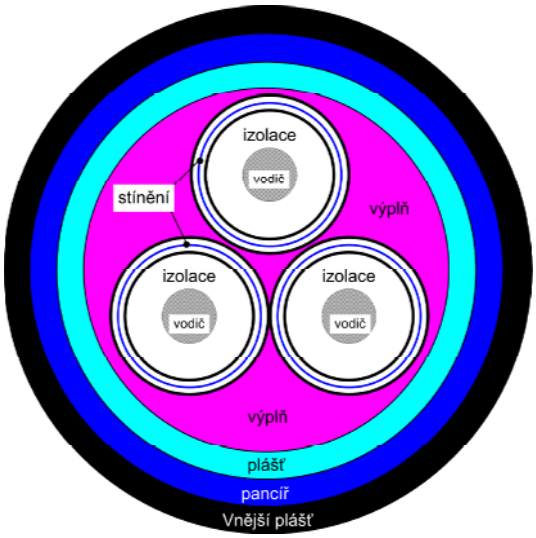
- *Závěsné kabely* - jsou tvořeny klasickým kabelem s hliníkovými vodiči, ke kterému je ve společné izolaci přičleněno nosné ocelové pozinkované lano. Tyto kabely se využívají v sítích nn. V současné době existují závěsné kabely vn (pro 22 a 35 kV) s označením SAXKA, které lze instalovat na nízkonapěťových stožárech nebo stožárech telekomunikačních systémů. Umožní se tím vn přenos bez nároků na hluboký zásah do krajiny, či provádění náročných výkopových prací například ve skalnatém terénu.

2. Kabely

Kabelové vedení se zpravidla ukládá do země. Kabely se používají na rozvod elektrické energie všude tam, kde pro velkou hustotu odběru, nedostatek prostoru, zachování bezpečnosti na frekventovaných trasách, velké zatížení apod. nelze použít venkovní elektrické vedení.

Silový kabel je soustava izolovaných vodičů (jader) chráněných vhodným pláštěm, případně dalším obalem proti působení vnějších vlivů, např. vlhkosti, chemickým vlivům, mechanickému namáhání apod., které se mohou v provozu vyskytnout a mohou ohrozit funkci kabelu. Kabel je složen z jedné nebo více žil, jejich jednotlivých obalů, případně ochranných vrstev, ochranných obalů. Kabel může obsahovat jedno nebo více přídavných neizolovaných jader. Izolace kabelů musí mít takové vlastnosti, aby po přiměřeně dlouhou dobu vyhověla provozu v přípustných podmínkách.

**Kabely se rozdělují především podle jmenovitého napětí, počtu žil, průřezu jader, materiálu jader (hliník nebo měď) nebo podle druhu obalu nad pláštěm.** Kabely vn jsou v podstatě izolované vodiče s papírovou izolací a olověným pláštěm. Normálně se vyrábějí s vodiči hliníkovými, pouze výjimečně také s měděnými např. pro použití v dolech nebo pro export. Pro napětí 1 kV se vyrábějí kabely jednožilové, trojžilové a čtyřžilové, pro napětí nad 1 kV maximálně trojžilové.




Obr. 12: Řez kabelem vn a 35 kV

**Kabely vn se vyrábějí pro řadu jmenovitých napětí 1, 3, 6, 10, 22 a 35 kV.** Pro napětí 1 až 10 kV se vyrábějí jako kabely s obvodovou izolací a v průřezech od 2,5 do 500 mm$^2$, pro napětí 22 kV a 35 kV pouze jako trojplášťové, tj. každá žíla má vlastní olověný plášť (kabely stíněné) a do maximálního průřezu 240 mm$^2$.

Kabely do 35 kV mohou mít papírovou izolaci a kovový obal (klasické), izolaci z měkčeného polyvinylchloridu, gumovou izolaci a izolaci z polyetylénu. Z hlediska bariéry proti vniknutí vody mohou být v provedení se standardní bariérou pod pláštěm, s přídavnou bariérou v jádře kabelu (zvýšená ochrana proti podélnému vniknutí vody) a jako vodotěsné provedení kabelu (zvýšená ochrana proti vniknutí tlakové vody).

Silové kabely sloužící pro přenos elektrické energie vvn mají speciální konstrukci. Mohou být olejové nebo tlakové podle toho, zda se ke zvýšení izolační schopnosti použije tlak plynu nebo oleje. Elektrická pevnost se tímto zvýší asi na dvojnásobek a více. Kabely vvn představují v porovnání s kabely vn a nn velkou úsporu hmoty vodiče, a to přibližně v poměru jmenovitých napětí [20].

## 1.3 Zásady pro stanovení průřezu vodiče

V podstatě se dá konstatovat, že již prvním kritériem návrhu vodiče je určení typu vedení, při kterém je nutné vzít v úvahu dané prostředí a podmínky provozu. Tím je v zásadě rozhodnuto i o druhu vodiče, zbývá stanovit jeho vhodný průřez, který zajistí přenos určitého výkonu za daných podmínek a v požadované kvalitě. Aby vodič spolehlivě plnil svou funkci, je třeba, aby jeho návrh vycházel z následujících zásad.

### 1.3.1 Základní výpočet průřezu

Aby bylo možné určit správný průřez vodiče, je nutné znát proud, který bude procházet vedením. Zpravidla je dán odebíraný výkon na konci vedení a průměrný účiník cos $\varphi$ (tabulková hodnota pro danou skladbu spotřebičů). Na základě těchto údajů se vypočte tzv. *výpočtový proud* pro trojfázový rozvod:

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} \qquad [A; W, V] \qquad [2]$$

U jmenovité sdružené napětí sítě,

$P_p$ výpočtové zatížení.

Výpočtové zatížení $P_p$ představuje celkový instalovaný výkon $P_i$ přenásobený součinitelem náročnosti $\beta$. Z hlediska hospodárnosti není vhodné dimenzovat vedení na celkový instalovaný výkon, neboť je málo pravděpodobné, že by všechny spotřebiče pracovaly současně na plný výkon. Proto se zavádí součinitel náročnosti $\beta$, který zmenšuje celkovou hodnotu instalovaného výkonu. Je dán tabulkově pro různé skupiny spotřebičů.

Výpočtový proud nesmí být vyšší než *trvalé proudové zatížení vodiče*, stanovené se zřetelem k jeho *dovolené provozní teplotě*. Jako dovolená provozní teplota se označuje taková hodnota teploty vodiče, která je stanovena (výrobce, normy) pro hospodárnou životnost vodiče nebo kabelu v závislosti na provozních podmínkách. Je to hodnota nejvyšší teploty vodiče nebo jen jeho nejteplejšího místa, při které je možno vodič nebo kabel trvale používat (viz tab. 7).

Na teplotu vodiče v provozních podmínkách má vliv proudové zatížení vodiče, při kterém vzniká teplo ztrátami na činném odporu vodiče, teplota prostředí, ve kterém je vodič uložen. U kabelových vedení je nutno počítat se vzájemným oteplováním kabelů, u venkovního vedení s vlivem přímého slunečního záření[1].

Z hlediska dovolené provozní teploty vodiče nebo kabelu je pro různé použité materiály jader vodičů normou stanovená hodnota *jmenovité proudové zatížitelnosti* $I_n$. Je to taková hodnota proudu, kterou je možno trvale zatěžovat vodič nebo kabel při základním způsobu uložení, aniž by se přitom překročila dovolená provozní teplota vodiče.

---

[1] Výrobce při stanovení jmenovité proudové zatížitelnosti AlFe lana již počítá s nejnepříznivějšími klimatickými podmínkami, tj. s maximální teplotou okolí, maximální intenzitou slunečního záření a minimálním větrem.

Jako základní způsob uložení vodiče se označují následující podmínky:

- Uložení ve vodorovné poloze v klidném vzduchu o základní teplotě.
- Vodorovné uložení v zemi s měrným tepelným odporem 0,7 Km/W v hloubce asi 70 cm pod povrchem terénu a s teplotou půdy 20 °C.

Tab. 7: Nejvyšší dovolená teplota jader vodičů a kabelů při normálním provozu a zkratu a základní teplotě 30°C

| **Druh vodiče nebo kabelu** | **Nejvyšší dovolená provozní teplota [°C]** | **Nejvyšší dovolená teplota při zkratu [°C]** |
|---|---|---|
| Napuštěný papír do 6 kV | 80 | 200 |
| Napuštěný papír do 10 kV | 75 | 200 |
| Napuštěný papír do 22 kV | 70 | 150 |
| Napuštěný papír do 35 kV | 65 | 150 |
| Vodiče s izolací XLPE a EPR od 1 do 30 kV | 90 | 250 |
| Holé vodiče plné nebo slaněné Al, Cu, mechanicky nezatížené | 80 | 300 |
| Holé vodiče plné nebo slaněné Al, Cu, mechanicky zatížené | 80 | 200 |
| Slitina hliníku | 80 | 170 |
| AlFe lana | 80 | 220 |
| Ocel mechanicky zatížená | 80 | 250 |
| Ocel mechanicky nezatížená | 80 | 300 |

Hodnoty jmenovité proudové zatížitelnosti $I_n$ pro daný typ vodiče stanoví jeho výrobce podle fyzikálních vlastností použitých materiálů. V praxi je ovšem nutné respektovat i jiné uložení vodiče nežli základní, proto jmenovitá proudová zatížitelnost přepočítává na tzv. *dovolené proudové zatížení* $I_{dov}$ podle vztahu:

$$I_{dov} = k_1 \cdot k_2 \cdot \ldots \cdot k_i \cdot I_n \qquad [2]$$

$k_{1,2-i}$ přepočítací součinitelé proudové zatížitelnosti.

Přepočítací činitelé respektují změnu zatížitelnosti vodiče nebo kabelu s ohledem na jejich uložení v různém prostředí (v zemi, v kanálech apod.), v různém seskupení a s různým zatížením (trvalý, krátkodobý, přerušovaný chod nebo zatížení). Hodnoty přepočítacích součinitelů jsou uvedeny v příslušných normách.

Dovolené proudové zatížení vodičů a kabelů se stanoví podle nejhorších tepelných podmínek na uvažované trase vedení, dosahuje-li délka úseku s nejhoršími podmínkami alespoň 10 metrů. Při kratších úsecích s nejhoršími tepelnými podmínkami se může připustit teplota v uvedeném místě

vodiče až o 15 °C vyšší, než je dovolená provozní teplota. Pokud je úsek s nejhoršími provozními podmínkami kratší než dva metry, není nutné tyto podmínky uvažovat.
Určení průřezu vodiče z hlediska dovolené provozní teploty pak lze definovat vztahem:

$$S \geq \frac{I_{dov}}{J} \qquad [mm^2; A, A/mm^2] \qquad [2]$$

J dovolená proudová hustota pro daný materiál vodiče.

Dále musí platit, že $I_p \leq I_{dov}$ [2].

Díky tomu, že v současné době výrobci vodičů a kabelů poskytují ve svých katalozích výrobků dostatečné informace o dovolených proudech pro dané průřezy, které již zahrnují koeficienty různých nejčastějších způsobů uložení, nejvyšší dovolené teploty a ostatních vlivů, lze snadno zjistit potřebný průřez vodiče nebo kabelu pouze na základě znalosti výpočtového proudu.

V praxi je možné postupovat i tak, že výpočtový proud $I_p$ ($\approx I_n$) se vydělí součinem všech přepočítacích součinitelů $k_{1,2\text{-}i}$ a výslednému proudu se v tabulce pro základní způsob uložení přiřadí potřebný průřez vodiče.

### 1.3.2 Kontrola průřezu

Dovolené proudové zatížení s ohledem na dovolenou provozní teplotu je primárním, ale ne jediným kritériem pro stanovení potřebného průřezu vodiče nebo kabelu. Správnost průřezu, ať už vypočteného nebo přímo stanoveného z tabulek, se musí ověřit podle několika dalších kritérií. Může se stát, že průřez nebude vyhovovat následujícím kritériím a bude muset být změněn.

1. <u>Odolnost proti dynamickým a tepelným účinkům zkratových proudů</u>

Vodiče pro silnoproudý rozvod musí být navrženy tak, aby odolávaly účinkům zkratových proudů. Tyto proudy mohou být několikanásobně vyšší, než proudy odpovídající jmenovitému zatížení, a proto je třeba kontrolovat jejich silové i tepelné účinky jak na vlastní vodiče, tak i na konstrukční prvky rozvodu. V některých případech je podstatné namáhání dynamickými silami při zkratech, v jiných případech má rozhodující význam tepelné namáhání.

*Odolnost vůči silovým účinkům zkratových proudů*[2] je obecně požadována u pevně uložených tuhých vodičů. V určitých případech může vlivem síly způsobené zkratovým proudem dojít ke kývání vodičů venkovního vedení, které může vést k jejich nechtěnému dotyku a následně i zkratu. Možným řešením problému kývání je použití mezifázových rozpěrek, které omezí pohyb vodičů tím, že je udržují od sebe (potlačují švihání vodičů). Deformace tuhých vodičů v důsledku dynamického působení zkratového proudu je přípustná tehdy, jestliže nenaruší provozuschopnost elektrického zařízení.

---

[2] Patří do problematiky mechanického dimenzování vodičů. Nemá přímo vliv na korekci velikosti průřezu, ale na uspořádání vodičů. Provádí se kontrola na maximální mechanické namáhání daného materiálu a kontrola na vznik mechanické rezonance a průhybu vodiče (přípojnic).

Největší hodnota síly, způsobená zkratovým proudem, bude hodnota odpovídající nejvyšší okamžité hodnotě zkratového proudu, tedy *nárazovému zkratovému proudu* $i_p$ ($I_{km}$). To je hodnota odpovídající prvnímu vrcholu proudu po vzniku zkratu a její velikost je:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k \text{ [kA; kA]} \qquad [2]$$

$\kappa$ součinitel nárazového zkratového proudu (vvn, zvn = 1,7; vn = 1,6; nn = 1,3 - 1,4),
$I''_k$ počáteční rázový zkratový proud (efektivní hodnota)

Pak síla mezi dvěma vodiči vztažena na délku jednoho metru je:

$$F_l = 0{,}2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{{i_p}^2}{a} \quad \text{[N/m; kA, m]} \qquad [2]$$

$k_1$ činitel tvaru vodiče respektující rozložení proudu po průřezu vodiče,
$k_2$ činitel respektující uspořádání vodiče a fázový posun proudů,
a vzdálenost vodičů.

*Tepelné účinky zkratových proudů* jsou dány působením časově proměnných zkratových proudů po dobu trvání zkratu na parametry vodičů. Při určování těchto účinků lze předpokládat, že doba trvání zkratu $t_k$, (součet úplné vypínací doby a doby působení ochrany) je natolik krátká, že vyvinuté teplo ve vodičích se nestačí odvést ani vyzářit a projeví se pouze zvýšením teploty vodičů. Teplo vyvinuté ve vodičích lze zapsat ve tvaru:

$$Q = \int_0^{t_k} R(\vartheta) \cdot i_k^2(t)\,dt \quad \text{[J; Ω, A]} \qquad [2]$$

R rezistance vodiče,
$i_k$ zkratový proud,
$t_k$ doba trvání zkratu.

Časově proměnný zkratový proud $i_k(t)$ lze nahradit tzv. *ekvivalentním oteplovacím proudem* $I_{th}$ ($I_{ke}$), který představuje konstantní hodnotu proudu a vyvolal by stejné tepelné účinky za dobu trvání zkratu, jako časově proměnný zkratový proud.

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \cdot \int_0^{t_k} i_k^2(t)\,dt} \qquad \text{[A; s, A]} \qquad [2]$$

V praxi se určuje hodnota tohoto proudu pomocí činitele $k_e$, který je stanoven tabulkově pro danou napěťovou hladinu, dobu a místo trvání zkratu. Nejmenších hodnot (1 až 1,1) nabývá při dobách zkratu 3 s a více, největších (1,5 až 1,7) při dobách zkratu pod 0,2 s. Vztah pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu pak je:

$$I_{th} = k_e \cdot I''_k \qquad [2]$$

Na základě znalosti $I_{th}$ a $t_k$ lze vyjádřit velikost minimálního průřezu vodiče, který vyhoví z hlediska tepelného namáhání zkratovým proudem:

$$S_{min} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{K} \qquad [mm^2; A, s, As^{1/2}/ mm^2]$$

K materiálová konstanta úměrná počáteční a koncové teplotě. Bývá určována tabulkově, graficky nebo výpočtem (orientačně 70 - 90 pro Al, 115 - 135 pro Cu) [2].

2. Dovolený úbytek napětí

Při dimenzování vodičů je důležitou součástí kontrola úbytku napětí na vodiči daného průřezu a délky. V elektrickém rozvodu je třeba zajistit, aby spotřebitel dostával elektrickou energii v pásmu dovolených odchylek od jmenovitého napětí (zpravidla ±10 %). Při přenosu elektrické energie vlivem zatěžování vodičů vznikají úbytky napětí, závislé na parametrech vodičů a velikosti proudu.

Úbytek napětí v sítích vvn a zvn lze pro sítě v ČR počítat jako vedení se soustředěnými parametry pomocí náhradních článků (článek *Π* má dostačující přesnost do délky vedení 500 km).

$$\hat{U}_1 = \hat{A} \cdot \hat{U}_2 + \hat{B} \cdot \hat{I}_2$$
$$\hat{I}_1 = \hat{C} \cdot \hat{U}_2 + \hat{D} \cdot \hat{I}_2$$

Dodržování velikosti napětí v distribučních sítích na hladině nn je obecně obtížné, zejména na koncích vedení. Tyto sítě jsou zásobovány přes transformátory vn/nn napájecím vedením vn z rozvodny vvn/vn. Úbytek napětí záleží na délce vedení vn, průběhu jeho zatížení a vzdálenosti uvažované distribuční sítě nn od napájecího uzlu vvn/vn. Jistým řešením je zde možnost nastavování odboček transformátorů vn/nn.

U vedení vn se počítá s vlivem rezistance a indukční reaktance. Pro výpočet úbytku napětí se využívá vztah uvedený v kapitole 1.3.1:

$$\Delta U_f = R \cdot I_č \pm X \cdot I_j = R \cdot I \cdot \cos\varphi \pm X \cdot I \cdot \sin\varphi \quad \begin{matrix}\text{induktivní}\\ \text{kapacitní}\end{matrix}$$

3. Hospodárný průřez vedení

Ztráty v elektrických vedeních se zmenšují se zvětšováním průřezů vodičů. Tímto ale stoupá cena vodičů a z ekonomického hlediska není vhodné zbytečně předimenzovávat průřez vedení. Určení optimálního průřezu z ekonomického hlediska nebývá jednoduché, neboť vyžaduje přesnější analýzu odběru v daném časovém období, který se navíc může s postupem času měnit.

Pro určení optimálního průřezu z ekonomického hlediska se vychází z tzv. *doby plných ztrát za rok* T [h/rok], která je definována jako čas, za který by maximální výpočtové zatížení způsobilo ve vedení stejné Jouleovy ztráty energie jako skutečné zatížení za jeden rok. Vypočte se ze vztahu:

$$T = t \cdot \left[ 0{,}2 \cdot \frac{A}{P_p \cdot t} + 0{,}8 \cdot \left( \frac{A}{P_p \cdot t} \right)^2 \right] \qquad [\text{h/rok; h/rok, kWh, kW, h}] \qquad [13]$$

t počet provozních hodin připojeného zařízení za rok,
A energie přenesená vedením za rok,
$P_p$ výpočtové zatížení (přenášený výpočtový výkon).

Hospodárný průřez vedení se poté vypočte ze vztahu:

$$S = k \cdot I_p \cdot \sqrt{T} \quad [\text{mm}^2\text{; A, h/rok}] \qquad [13]$$

k součinitel (pro Cu 0,0053 - 0,006; pro Al 0,009 - 0,014),
$I_p$ výpočtový proud.

Jinou možností určení hospodárného průřezu vedení je určení tzv. *specifické hospodárné hustoty proudu* $J_{ek}$ pro daný materiál vodiče z grafů na základě znalosti doby plných ztrát *T* [13].

$$S = \frac{I_p}{J_{ek}} \qquad [\text{mm}^2\text{; A, A/mm}^2] \qquad [2]$$

Hospodárný průřez se kontroluje jen v těch případech, kdy počet hodin doby plných ztrát za rok *T* je větší než asi 1000 hodin a kde se očekává, že zařízení bude v provozu aspoň 10 let. Vypočtený hospodárný průřez se zaokrouhlí na nejbližší (i nižší) normalizovaný průřez. Takto stanovený hospodárný průřez je pro dimenzování rozhodující jen tehdy, je-li větší než průřezy vypočtené podle technických kritérií, tj. kritérií uvedených v předchozích bodech [13].