

Regulace U v ES

Obsahem přednášky je vysvětlit:

1. Princip regulace Q a U v ES.
2. Regulaci Q a U v PS - primární, sekundární a terciární regulace v ES.
3. Regulaci Q a U v DS.

1. Cíle regulace U a Q

Hlavními cíli regulace napětí v ES je vždy:

- *snížení technických ztrát v provozované ES spolu se snížením dalších nákladů provozního a investičního charakteru,*
- *zajištění kvality dodávky elektřiny odběratelům (stabilita napětí).*

Snížení technických ztrát představuje minimalizaci ztrát dopravou elektřiny od výrobců ke spotřebitelům. Procházejícím výkonem přes jednotlivé prvky PS a DS dochází ke vzniku ztrát. Protože výkon procházející přes tyto prvky je úměrný napěťovým hladinám, lze výkon protékající jednotlivými prvky dopravního systému (vedení, transformátory) regulovat rozložením napětí v ES. Samozřejmě to lze provádět i změnou zapojení dopravních cest.

Kvalita dodávky u napětí představuje dodržení tolerančních v místě předání mezi jednotlivými subjekty ES. Tj. mezi PS a DS jsou to transformátory ZVN/VN a mezi DS a zákazníky jsou to jednotlivá odběrová místa na napěťových hladinách VN a NN dle kategorie zákazníka.

V ES, jak bylo vysvětleno je velmi silná vazba mezi jalovým výkonem a napětím, které mají lokální charakter, tj. na rozdíl od frekvence, která je v propojené soustavě všude stejná, může být napětí v jednotlivých místech ES různé.

Je tedy možno provádět regulaci napětí jak *centralizovaně*, tak i *decentralizovaně* – držet hodnotu napětí místně na požadované hladině pomocí regulačních prostředků ovlivňujících hladinu napětí. Hladinu napětí v určitém místě ES můžeme měnit tedy:

- *změnou hodnoty jalového výkonu,*
- *změnou napětí pomocí nastavení převodu transformátorů.*

Změnu jalového výkonu v určité části ES dosáhnou změnou Q:

- Na straně odběru – kompenzace.
- Na straně dodávky – změna Q u výrobců, nebo regulačních prostředků ES.

Regulaci U lze provádět rovněž pomocí prvků ES bez změny Q, tj. prostřednictvím změny převodového poměru transformátorů.

Změnou napětí v příslušné části ES (uzel ES) soustavy se dosáhne změny napětí v tomto uzlu a uzlech elektricky blízkých. Změna napětí závisí nejen na velikosti změny dodávky jalového výkonu, ale také na aktuálním zapojení daného uzlu. Lze definovat určitý parametr ES, který vyjadřuje náchylnost určitého uzlu ES ke změně napětí - **elektrické tvrdosti uzlu** (K_Q), což je množství Q potřebné ke změně napětí o 1kV v daném uzlu.

Velikost K_Q je závislá na:

- *napěťové hladině,*
- *zatížení uzlu.*

Zatížení uzlu je dáno hodnotou a charakterem jeho zatížení - ohmické, induktivní a kapacitní.

1.1 Provozní kritéria pro U a Q

Na základě stanovených cílů pro regulaci u a Q v ES lze pak definovat provozní kritéria – podmínky, které musí být splněny při regulaci:

- *napětí v uzlech PS se musí být držena uvnitř povoleného rozsahu - 400 kV ± 5 %, 220 kV ± 10 % a 110 kV ± 10 %,*
- *jalové výkony mezi jednotlivými ES by neměly protékat – minimalizace ve spolupráci tuzemské a zahraniční PS,*
- *jalové výkony zdrojů jalového výkonu pro regulaci (synch. generátorů a synch. kompenzátorů) nesmí překročit povolený regulační rozsah, který je dán provozním P-Q diagramem,*
- *musí se snížit ztráty dopravou elektřiny ke spotřebitelům.*

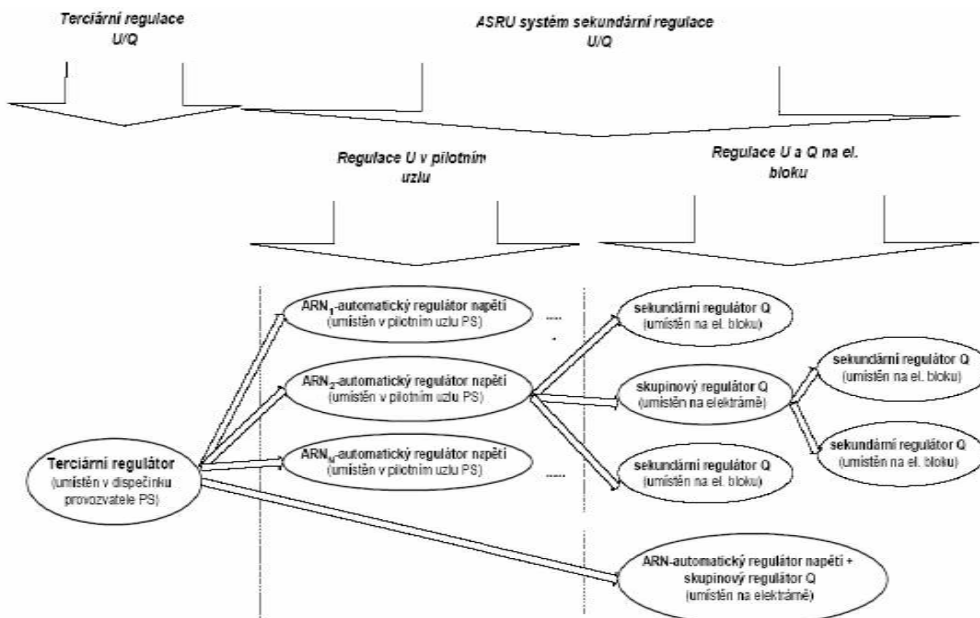
Pro splnění daných požadavků je nutno zvolit určitou metodu (regulaci), tak aby tato kritéria byla dodržena.

2 Koncepce regulace napětí aplikovaná v ES ČR

V ČR byla v ES aplikovaná třístupňová hierarchie při řízení napětí.

- *terciární regulace napětí – na úrovni celé regulované soustavy,*
- *sekundární regulace napětí – na úrovni jednoho uzlu soustavy,*
- *primární regulace napětí – na úrovni jednoho bloku výroby (elektrárny, teplárny nebo závodní elektrárny apod.).*

Blokové rozčlenění regulace je znázorněno na obr. 1.



obr.1 Základní blokové schéma regulace U a Q v ES.

2.1 Terciární regulace napětí a jalových výkonů (TRN)

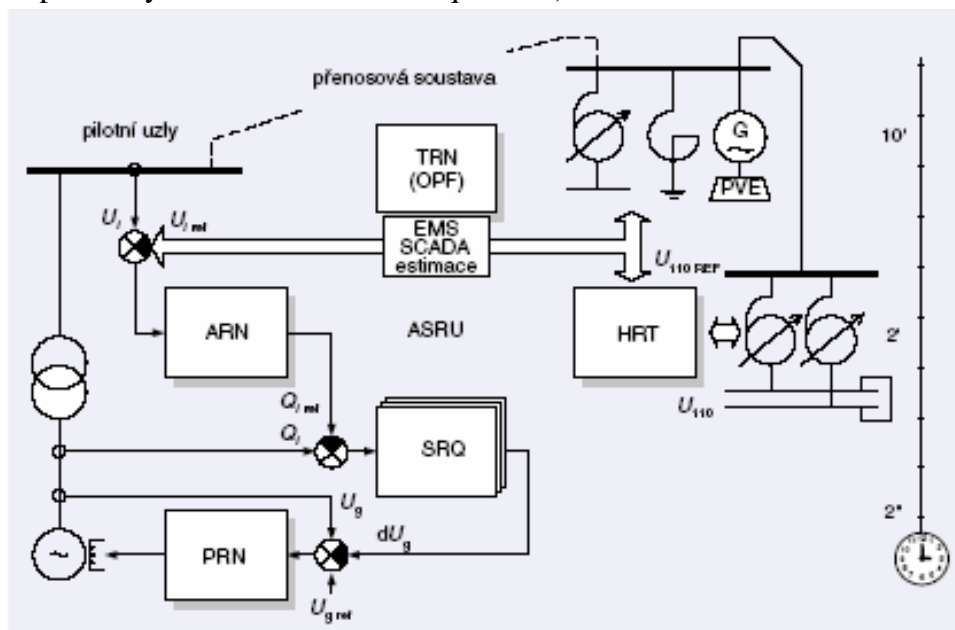
TRN je centralizovaná služba, která koordinuje toky jalových výkonů a velikosti napětí pro bezpečný a ekonomický provoz ES. Funkce terciární regulace U a Q v reálném zajišťuje optimální funkci celého regulačního systému Q,U. Musí pracovat automaticky, lidský faktor –

dispečer není schopen určovat zadaná napětí v pilotních uzlech a optimalizovat koordinaci regulačních prostředků prováděnou nastavením odboček transformátorů a nasazováním kompenzačních prostředků.

TRN koordinuje zadaná napětí v **PILOTNÍCH UZLECH** pro bezpečný a ekonomický provoz ES jako celku. Základním kritériem je minimalizace technických ztrát v regulované soustavě. Proto pro regulaci v pilotních uzlech jsou stanoveny podmínky které jsou při terciární regulaci respektovány:

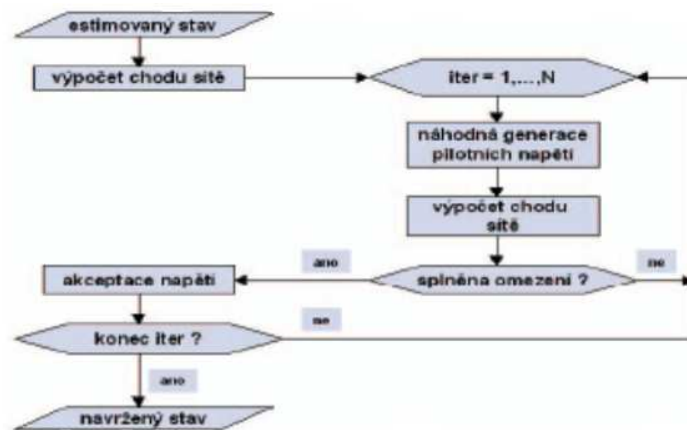
- *musí být dodržena tolerance U v uzlech - minimální a maximální hodnoty (technická omezení),*
- *při regulaci se respektují aktuální hodnoty rezervy regulačního jalového výkonu pro jednotlivé pilotní uzly,*
- *nesmí jít toky jalového výkonu např. přes hraniční vedení v případě přenosové soustavy nebo přes transformátory PS/110kV v případě distribuční soustavy 110kV atd.,*
- *další omezovací podmínky podle konkrétních místních podmínek.*

TRN a jalových výkonů (obr. 2) probíhá v ES v reálném čase a je zajišťována odpovídajícím optimalizačním programem, který je součástí souboru vyšších dispečerských funkcí (VFDŘ) (viz. Před. Dispečerské řízení sítí) poskytovaných EMS/SCADA (Energy Management System / Supervisory Control And Data Acquisition).



obr.2: Regulace U a Q v PS ČR.

Program provádí výpočet chodu sítě, kterým se určují jednotlivá napětí v uzlech, výkony a proudy ve větvích ES. Jako vstupní data se musí zadat konfigurace ES, parametry jednotlivých vedení, činné a jalové odebírané výkony a velikost napětí v bilančním uzlu (pilotním). Přestože tyto data jsou prostřednictvím komunikačního rozhraní dodávána do dispečinku, je nutné provádět estimaci – odhad stavu sítě. Estimace zpracovává redundantní soubor reálných měření, využívá parametry vedení a transformátorů a řešením systémů rovnic získává nejpravděpodobnější odhad aktuálního provozního stavu – estimované hodnoty. Výpočet nových stavů (napětí v pilotních uzlech) se provádí iterační metodou – obr.3.



obr.3: Algoritmus TRN.

Výstupem z programu je hodnota nastavení napětí v pilotních uzlech soustavy, což jsou vstupy pro automatickou regulaci napětí (ARN) – sekundární regulaci napětí (SRN), kdy se provede vyregulování na požadovanou hodnotu napětí pomocí sekundární regulátorů prostředky disponující možností změny Q připojených k tomuto uzlu, což mohou být:

- elektrárenské zdroje pracující v dodávce činného výkonu,
- elektrárenské zdroje pracující v kompenzačním režimu – PVE,
- transformátory včetně tlumivek v terciárním vinutí,
- výkonové tlumivky,
- rotační kompenzátory.

viz. obr. 2.

2.2 Sekundární regulace napětí a jalových výkonů (SRN)

Funkci automatické regulace napětí (ASRU) lze obecně popsat jako technologický proces, který obnovuje rovnováhu spotřeby a výroby jalového výkonu v pilotním uzlu právě na úrovni požadovaného napětí v tomto sledovaném místě. ASRU se skládá z:

- Automatické regulace napětí (ARN),
- Skupinové regulace napětí (SRU),
- Sekundární regulace jalového výkonu (SRQ),
- Regulatoru odboček transformátoru PS/110kV – hladinová regulace trať (HRT).

Blokově znázorněný princip ASRU je na obr.4

ARN vyhodnotí aktuální regulační odchylku, vypočte celkovou změnu jalového výkonu, která je nutná pro její eliminaci a podle existující regulační rezervy provede rozdělení požadavku na jednotlivé SRU, které má pro regulaci v daném uzlu k dispozici. SRU na elektrárně rozdělí svůj požadavek podle rezervy na jednotlivé SRQ generátorů. SRQ generátorů pak generují velikost impulsu na mechanismus změny zadané hodnoty napětí PRN, který změní velikost jalového výkonu. Tato změna vstupuje přes blokový transformátor zpět do soustavy.

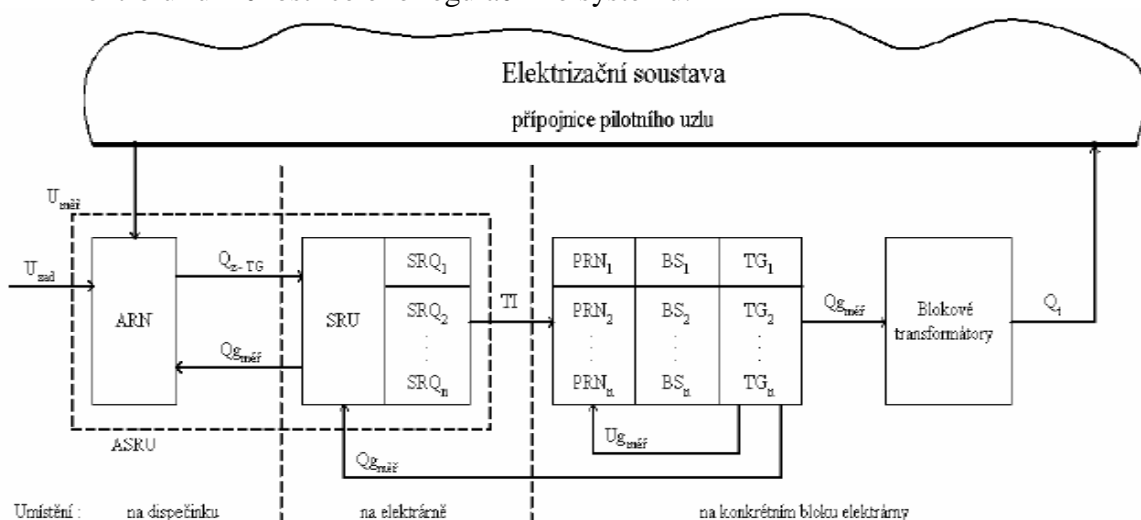
Regulační proces musí být aperiodický nebo maximálně s jedním překmitem. Výsledná doba regulace nesmí být větší než 120 s.

2.2.1 Funkce ARN

Automatický regulátor napětí provádí tyto operace:

- modifikaci zadané hodnoty napětí (U_{zad}) a styk s operátorem,

- získání a verifikaci vstupních měření a signalizací řízeného systému. Určení aktuálního rozsahu UO 110 kV,
- určení velikosti regulační odchylky napětí: $\Delta U = U_{zad} - U_{měř}$
- výpočet charakteristiky pilotního uzlu v uzlové oblasti (UO) 110 kV: $K_Q = \Delta Q / \Delta U$ (MVar/kV)
- proporcionálně integrační transformaci ΔU na odchylku ΔQ (změna dodávky jalového výkonu),
- výpočet příslušných P-I konstant podle aktuálního zapojení UO 110 kV
- výpočet regulačních zásahů pro jednotlivé SRU podle zadaného kritéria (stejná poměrná rezerva jalového výkonu) a jejich předání na SRU,
- ošetření omezujících podmínek (dodržování technického minima a maxima napětí, atd.)
- kontrolu funkčnosti celého regulačního systému.



ARN ...	automatický regulátor napětí	$Q_{g-měř}$...	jalový výkon měřený na svorkách TG
SRU ...	skupinový regulátor napětí	$U_{g-měř}$...	měřené napětí na TG
SRQ ...	sekundární regulátor jalového výkonu	Q_{s-TG} ...	zadaný jalový výkon pro konkrétní TG
PRN ...	primární regulátor napětí	TI ...	délka impulzu na PRN
BS ...	budicí souprava	Q_1 ...	jalový výkon za blokovým transformátorem
TG ...	turbogenerátor		
$U_{měř}$...	napětí na regulované přípojnici		
U_{zad} ...	zadané napětí na regulované přípojnici		

obr.4: Blokové schéma SRN.

2.2.2 Skupinový regulátor napětí (SRU)

Skupinový regulátor napětí SRU v rámci pokynů ARN zajišťuje na elektrárnách tyto hlavní funkce:

- získání a verifikaci vstupních měření a signalizace z technologie výroby,
- získání vstupních požadavků ze strany ARN a zpětné předání informací o svém aktuálním stavu,
- rozdělení požadovaných regulačních zásahů jalového výkonu na jednotlivých strojích regulační smyčky (podle zadaného kritéria) na jednotlivé SRQ,
- povelování změny odbočky transformátoru vlastní spotřeby, příp. blokového transformátoru, v případě, že jsou tyto transformátory vybaveny možností regulace odboček pod zatížením.

2.2.3 Sekundární regulace jalového výkonu generátoru

SQR zajišťuje realizaci povelu SRU pomocí vstupu do primárního regulátoru napětí generátoru (PRN) do bloku mechanismu změny zadané hodnoty generátorového napětí. Pracuje jako impulsní regulátor tzn., že požadavek na velikost změny zadané hodnoty napětí měří časem (délkou impulsu - TI).

Funkci SRQ je:

- výpočet regulační odchylky: $\Delta Q = Q_{\text{genZad}} - Q_{\text{gen}}$
 - Q_{genZad} - zadaná hodnota jalového výkonu generátoru
 - Q_{gen} - jalový výkon generátoru (tvoří zpětnou vazbu pro SRQ),
- proporcionalně-integrační transformace ΔQ na odchylku ΔQ ,
- výpočet P-I konstant pro jednotlivé stroje (vstupy pro výpočet),
- výpočet délky impulsu (TI) pro požadovanou velikost regulačního zásahu,
- ošetření všech omezujících podmínek provozu generátoru, včetně vlastních spotřeb bloků a s respektováním funkce automatické regulace činného výkonu turbín.

Do systému ASRU lze připojovat libovolné typy generátorů. Podmínkou je, že tyto generátory musí mít možnost dálkové regulace napětí generátoru. Tuto možnost mají všechny generátory instalované po r. 1965 a tvoří standardní výbavu všech generátorů instalovaných v současnosti.

2.3 Primární regulace napětí

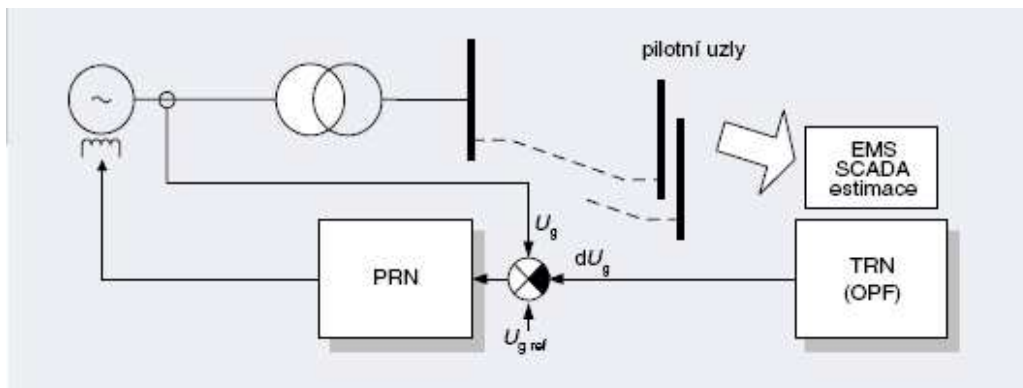
Úkolem PRN je udržovat zadané svorkové napětí generátoru pomocí změny buzení generátoru. Regulace reaguje v časovém rozmezí 1 – 2 s na rychlé změny zátěže, topologie systému a další přechodové jevy. Působí lokálně a má přímý vliv na stabilitu celého systému prostřednictvím nastavených mezí daných maximálním proudem statoru, rotoru nebo mezi podbuzení. Kompaukace pomocí nastavené statiky generátoru definuje vazbu mezi změnami napětí generátoru a jím generovaného jalového výkonu. Funkce je analogická funkci primárního regulátoru kmitočtu.

Jednotlivé budicí soustavy generátorů jsou různé podle typů generátorů a data uvedení generátorů do provozu. Použité druhy budičů generátorů, z hlediska jejich zařazení do ASRU, nemají žádný omezující vliv na činnost ASRU.

Blokové transformátory sloužící pro vyvedení výkonu do PU jsou v ES ČR většinou bez možnosti regulace odboček pod zatížením. V těchto případech působí z hlediska ASRU jako pasivní prvky s tím, že ovlivňují velikost použitelných regulačních rozsahů Q (nevhodná volba omezí čerpání regulačního jalového výkonu).

3 Jiné možnosti provedení regulace U a Q v PS

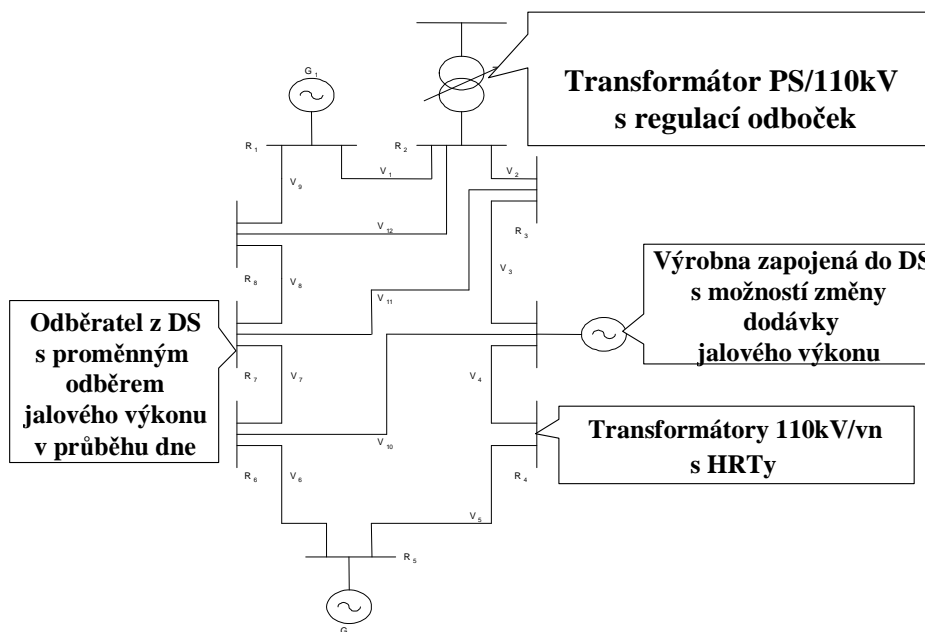
Jako příklad jiné možnosti provedení regulace je systém realizovaný v Belgické PS – obr.5. V této soustavě sekundární regulace není realizována. Regulace se provádí na základě požadavku TRN kdy je dálkově měněno napětí na vybraných generátorech. Změna jalového výkonu ostatních generátorů se provádí na požadavek dispečera telefonicky. Stanovená cílová funkce pro regulaci je maximalizace disponibility rezervy jalového výkonu.



obr.5: Regulace U a Q v belgické PS.

4 Regulace Q a U v distribučních soustavách

DS pracuje na napěťových hladinách VVN, VN a NN. Předávacím místem mezi PS a DS jsou transformátory 400/110 kV a 220/110 kV, kde napětí 110 kV představuje referenční hodnotu napětí, která je v těchto bodech držena PS. Úkolem DS je držet hladinu napětí v předávacích místech pro odběratele – obr. 6.



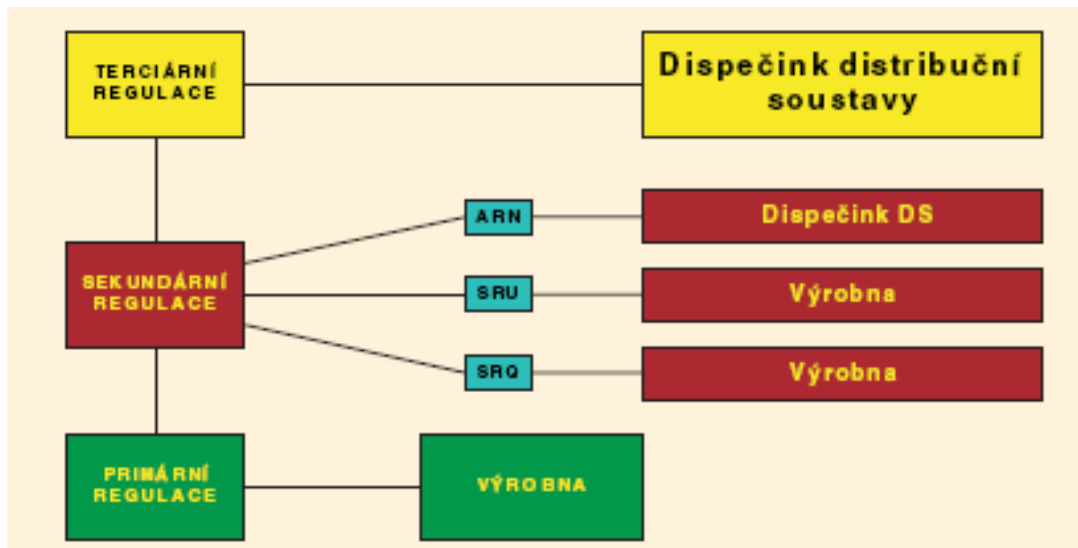
obr. 6 : Topologie DS.

Princip regulace je totožný s PS. Pro automatickou regulaci U a Q mohou být využívány prostředky, které jsou umístěny v DS, tj. regulační transformátory VVN/VN, generátory připojené do DS na VVN straně. Regulace napěťové hladiny v odběrových místech NN – distribučních trafostanicích (DST) VN/NN automaticky není možná, protože v současnosti přepínání odboček lze provádět pouze ručně.

ARN je prováděna jen držením hladiny napětí v pilotních uzlech 110 kV. Blokové schéma regulace u a Q je ukázáno na obr.7.

V uzlových oblastech (UO) 110 kV se provádí autonomní regulace v jednotlivých pilotních uzlech 110 kV napojených na příslušnou transformovnu VVN/VN (regulace prostřednictvím nastavení odbočky transformátoru hladinovým regulátorem trafo – HRT), nebo elektrárnou ve které jsou generátory zařazené do ASRU a v dané UO110 udržují zadaná napětí na příslušné

přípojnici 110 kV, což je obvykle na prahu elektrárny. Tato regulace se uskutečňuje pomocí regulátorů SRU a SRQ. Regulační procesy jsou obdobné jako v PS. Aktuální identifikaci jednotlivých UO110, koordinaci činnosti všech akčních členů v regulačních procesech zajišťuje nadřazená stanice ARN, která je umístěna na dispečincích REAS – obr.7



obr. 7: Blokové schéma automatické regulace U a Q v DS.

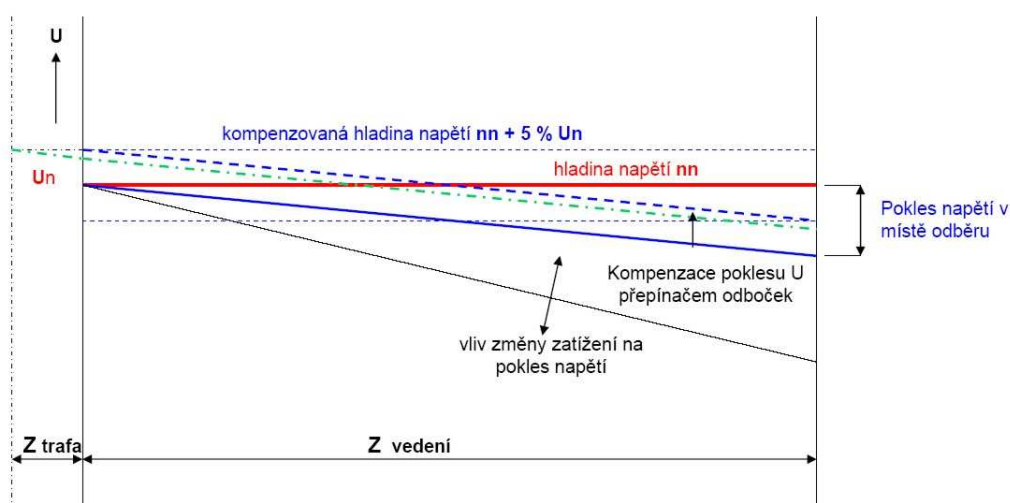
Regulační transformátory VVN/VN má k dispozici obvykle 2 x 8 odboček po napěťových krocích 1, 5 % U_n . Při rychlých změnách zatížení, kdy dochází současně k většímu poklesu napětí v systému VN, dokáže přepínač na popud z regulátoru plynule přepnout o více odboček.

4.1 Odlišnosti v provozu ES a DS

Provoz sítě 110 kV má v porovnání s provozem PS některé zvláštnosti, které nelze při řešení zavedení ASRU opomenout. Sítě 110 kV v současné době nejsou provozovány paralelně a s vedeními PS a tvoří uzlové oblasti 110 kV, které jsou paprskovitě napojeny přes rozdělovací transformátory PS/110 kV na PS. Při provozování dlouhých vývodů vznikají obvykle dva problémy, které vedou snadno k překročení mezí tolerančního rozmezí napětí ± 10 % povoleného dle ČSN EN 50160:

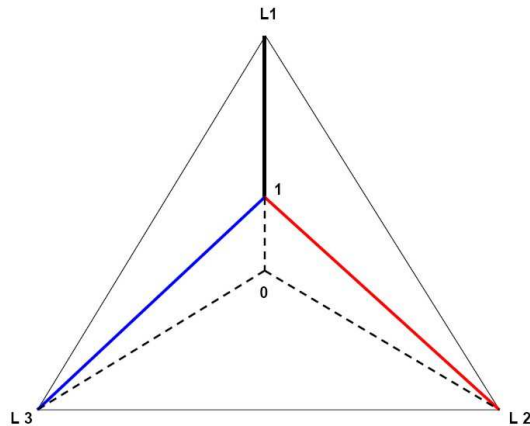
- nežádoucímu poklesu napětí na koncích dlouhých vývodů,
- vliv nesymetrické odběrů na konci vývodů deformací fázových napětí.

Nežádoucí pokles napětí souvisí s narůstající impedancí mezi napětím na počátku paprsku a na jeho konci, ale hlavně s narůstajícím odběrem vzrůstá proud ve větvi a tím i úbytek. Tato situace je ještě výraznější v případě paprsku na hladině NN – obr. 8.



obr. 8: Pokles napětí na dlouhých vedeních a jeho kompenzace.

Nesymetričnost odběru vede k deformaci fázových napětí – obr.9.



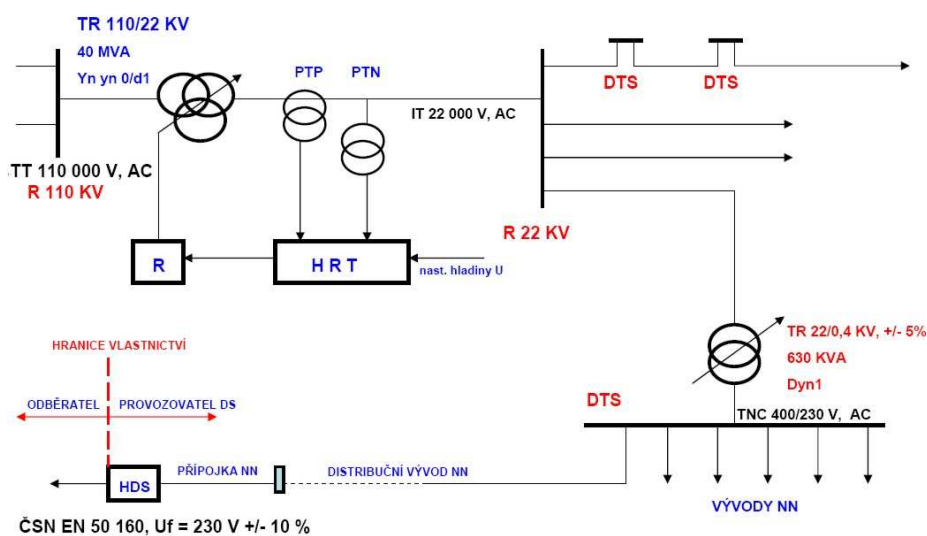
obr. 9: Nesymetrický odběr v jedné fázi.

Při nesymetrickém jednofázovém zatížení dochází k úbytku na fázovém i středním vodiči a v místě odběru se to projeví posunem uzlu hvězdy do bodu 1. Fázové napětí ve fázi může klesnout pod spodní hranici tolerance, kdežto napětí na nezatížených fázích může překročit horní hranici.

Problémy se dají logicky řešit zkrácením linek, tj. přiblížením transformačních stanic, a zmenšením hodnoty impedance zvětšením průřezů vodičů.

4.2 Regulace na straně NN

Jak bylo konstatováno nejsou transformátory VN/NN v DST zařazeny do ARN. V případě potřeby je možné přepnout odbočku bez napětí ručně. Odbočky jsou $\pm 5\%$ na primárním vinutí, čímž se zvýší nebo sníží hodnota o 5 % na sekundárním vinutí NN. Regulace napětí pomocí regulačních transformátorů v DS je ukázána na obr.10.



obr.10: Regulace U v DS pomocí regulačních.