

PRAVDĚPODOBNOST A SPOLEHLIVOST V ELEKTROENERGETICE

1. Úvod

Všude kolem nás probíhá velké množství jevů a událostí, které nelze předvídat (*foresee*), poněvadž jsou dílem náhody. Jako příklad lze uvést počet automobilů, které projedou kolem kontrolního stanoviště během jedné hodiny, počet studentů, kteří přijdou na přednášku (*lecture*), dobu trvání nemoci, průměrné červnové srážky na území České republiky, nebo nejvyšší teplotu která bude zítra změřena v pražském Klementinu.

Nahodilé jevy (*random effects*) a události mohou často velmi významně ovlivňovat všechny sféry našeho života. My se však, s ohledem na zaměření tohoto kurzu, budeme zabývat problematikou jejich výskytu (*occurrence*), kvantifikace (*quantification*) a vzniklých důsledků pouze v elektroenergetice. Získané poznatky lze ovšem po nezbytných modifikacích zpravidla aplikovat i v mnoha dalších oblastech.

Dokonalý návrh (*perfect design*) jakéhokoli elektroenergetického systému (*electrical power system*) by bylo možno provést pouze na základě úplného a korektního souboru (*complete and correct set*) vstupních informací. Tyto informace by měly zahrnovat všechna data týkající se výroby elektrické energie, jejího přenosu a spotřeby, a to v jejich dynamické (tedy časově závislé) podobě. Bohužel, takový požadavek je naprosto nereálný (*quite unreal*), neboť provoz konkrétního systému (*operation of a particular system*) je ovlivněn nemalým množstvím náhodných faktorů (*random factors*). Pro ilustraci lze jmenovat nárůst spotřeby (*growth of consumption*) v nejbližších pěti letech, počet a dobu trvání výpadků (*outages*) jednotlivých elektrárenských bloků či přenosových tras (*transmission lines*) v důsledku poruch (*failures, faults*) z nejrůznějších příčin atd. Vstupní informace jsou proto vždy zatíženy určitou mírou nejistoty (*uncertainty*).

Systém však musí být vyprojektován i tehdy, jsou-li vstupní informace neúplné. Jde pak o to, jak se co nejlépe se zmíněnými nejistotami vypořádat.

Až do nedávné doby (*until recently*) převládala (*prevailed, predominated*) praxe, která vycházela z respektování nejnepříznivějších podmínek (*the least favourable conditions*), při nichž mohl být systém provozován (nejdelší možná trvání výpadků (*the longest possible outage duration*), extrémní vlivy počasí (*influences of weather*), nejvyšší možné zkratové proudy (*fault currents*) atd.). Takto navržené elektroenergetické systémy jsou sice bezpečné a spolehlivé (*safe and reliable*), ale náklady (*costs*) na jejich vybudování jsou extrémně vysoké (*extremely high*). Na druhé straně (*on the other hand*) samozřejmě nelze konstruovat takové systémy, které by byly nespolehlivé (*unreliable*), nebo dokonce nebezpečné pro obsluhující personál (*unsafe to the operating personnel*) či širší veřejnost (*wide public*). Proto se v současné době (*at the present time*) začínají prosazovat taková řešení, která vycházejí z kompromisu (*compromise*) mezi náklady a ziskem (*benefit*), a to při zachování nezbytné hladiny bezpečnosti a spolehlivosti (*safety and reliability*). Pro jakoukoli nejistotu pak musí kompromisní analýza vzít v úvahu (*take into account*) její vliv na dané rozhodnutí (*decision*). Typické příklady nejistot a jejich posuzování (*evaluation*) jsou uvedeny v následujících odstavcích (*in the following paragraphs*).

Spolehlivost výrobní rezervy

Výrobní jednotky (*generation units*) jsou navrhovány a provozovány tak, aby riziko (*risk*), že nebudou schopny pokrýt zatížení (*cover the load, meet the load*) v libovolném okamžiku (*at any time*), bylo nižší, než je předepsaná (*prescribed, predetermined*) úroveň. Tradičně (*traditionally*) bývá tento požadavek splněn tím, že existuje 25% výrobní rezerva (*generation reserve*) k pokrytí jakéhokoli zatížení v budoucnu. Studie o instalovaném výkonu (*in-*

stalled capacity) dopomáhají projektantům (*design engineers*) k rozvržení a instalaci (*scheduling*) dalších jednotek, které budou schopny pokrýt zatížení tak, jak poroste v následujících letech. Stavba elektráren (*construction of new power plants, stations*) je extrémně nákladná, proto rozhodnutí vybudovat novou elektrárnu předchází komplexní vyčerpávající studie (*exhausting studies*), která zahrnuje načasování (*timing*) nových výrobních jednotek, jejich typ, umístění (*location*) atd.

Klíčovými údaji vstupujícími (*the key data entering*) do takové studie jsou: nárůst zatížení v budoucnu, provozní spolehlivost (*reliability performance*) výrobních jednotek daná četností (*frequency*) a délkou trvání výpadků (*duration of outages*), požadavky na obsluhu (*maintenance requirements*), dostupnost kapitálu (*availability of capital*), možnost vybudování koridorů (*corridors*) pro přenos vyrobené energie, společenské a politické klima (*social and political climate*) atd. Všechny tyto údaje v sobě obsahují určitou míru nejistoty. Zatížení závisí na nárůstu populace (*population growth*) a na stavu ekonomiky (*state of the economy*). Četnost poruch či výpadků dílčích jednotek lze předpovídat (*predict*) na základě předchozího chování (*performance, behaviour*) podobných jednotek. Zda bude energie vyráběna v jaderných (*nuclear*) nebo vodních elektrárnách, bude záviset na politickém klimatu (přijatelnost (*acceptability*) jaderných elektráren pro veřejnost (*to the public*)) a na dostupnosti paliv (*fuels*). Posouzení těchto nejistot včetně následných rozhodnutí se neobejde bez pravděpodobnostních úvah.

Elektrický návrh rozvoden

Vhodným příkladem toho, jaké problémy musí řešit projektanti elektrizačních soustav, je výpočet zkratových proudů a návrh venkovních rozvoden (*air-insulated substations*).

Rozvodna sestává z dílčích prvků (vypínače (*circuit breakers*), odpojovače (*switches*), systémy přípojníc (*bus bar systems*) atd.) které zajišťují řízení toku energie (*flow of power*) v síti za normálních podmínek a izolaci poškozených částí při zkratech či jiných poruchách. Venkovní rozvodny mívají většinou dva systémy přípojníc.

Pevné přípojnice (*rigid bus bars*) často sestávají z masivních vodičů (*massive conductors*) podepřených (*supported*) na poměrně krátkém rozpětí (*span*) porcelánovými izolátory (*porcelain insulators*) (existují ovšem i jiné systémy přípojníc). Mezi nejdůležitější parametry, které ovlivňují jejich mechanické namáhání (*stress, strain*), patří velikost zkratového proudu, průřez vodičů a rozpětí (*span length*). Zkratový proud je funkcí konfigurace elektrizační soustavy v okamžiku poruchy (ta se může dosti výrazně měnit s časovým průběhem zatížení), počtu a rozmístění generátorů a polohy místa zkratu vzhledem k rozvodně. Proto se může jeho velikost měnit v dosti širokém rozsahu.

Projektant musí navrhnout jak průřez přípojníc, tak i typ izolátorů, šířku rozpětí a řadu dalších parametrů. Optimální návrh (*optimal design*) by měl být vycházet z (*start from*) minimálních očekávaných nákladů, které zahrnují cenu pozemku (*cost of land*) (je ovlivněna rozpětím přípojníc), cenu materiálu (typ vodičů, izolátory) a cenu ztrát (*cost of losses*) (ovlivněna průřezem a délkou vodičů). Je zřejmé, že tyto náklady jsou složitou funkcí pravděpodobné velikosti zkratového proudu.

Návrh přenosových tras vysokých a velmi vysokých napětí

Přenosové trasy představují jednu z hlavních složek (*vital component*) elektrizační soustavy. Přenášejí energii z místa výroby do místa spotřeby (*load point*). Během své životnosti podléhají (*are subjected to*) velkému množství klimatických jevů (*climatic events*) (větrné bouře (*wind storms*), námraza (*icing*), kombinace ledu a větru, prudké změny teplot). Odezvou (*response*) na tyto změny jsou mechanická namáhání a případné deformace různých komponent (lana, stožáry (*ropes, towers*)). Tyto odezvy ovšem závisejí nejen na klimatických jevech, ale i na momentální konfiguraci sítě (*actual configuration of the network*). Tradiční

návrh přenosových tras zahrnuje dimenzování (*sizing*) dílčích elementů, které mají odolat (*withstand*) několika vybraným kombinacím rychlosti větru, ledu a teplot. Jakmile tyto prvky odolají zátěži tvořené těmito kombinacemi, očekává se, že budou odolávat i jiným nepříznivým klimatickým jevům.

Při návrhu přenosových tras je tedy nutno počítat s pravděpodobností výskytu nepříznivých klimatických jevů. Chování použitých materiálů nelze rovněž předvídat zcela přesně. Četnost zmíněných jevů jakož i materiály použité při konstrukci stožárů a vedení ovlivní jednak náklady a jednak spolehlivost přenosové trasy. Optimální návrh musí zahrnovat minimalizaci celkových nákladů, jež zahrnují investiční náklady (*investment costs*) a náklady způsobené výpadky (včetně nákladů na přemístění výroby (*generation replacement costs*) a nákladů potřebných na opravu (*repair costs of*) stožárů, vedení a dalších prvků). Do pravděpodobnostních výpočtů by měly být zahrnuty příslušné nejistoty.

Pravděpodobnostní výpočty přenášených výkonových toků

Výpočty ustálených stavů (*load flow computations*) představují důležitý nástroj (*tool*) pro analýzu chování současných a budoucích (*present and future*) energetických systémů. Zahrnují vyhodnocování velikosti napětí na přípojnicích (*bus voltage*) a účinníku (*power factor*) (případně jalového výkonu (*reactive power*)). Výkonový vstup na přípojnicích sestává ze dvou složek: zatížení a výroby (*load value and generation capacity*). Obě tyto veličiny jsou náhodné proměnné (*random variables*), stejně jako výsledné toky výkonů. Navíc může dojít k výpadku různých přenosových tras, čímž dochází k dalším komplikacím při určování příslušných nejistot.

Nejobecnější výpočty těchto toků zahrnují řešení nelineárních algebraických rovnic pro velikosti napětí a úhly (*angles*) při daných výkonových vstupech. Výsledné toky jsou proto funkce náhodných proměnných reprezentujících vstupy výkonů na přípojnicích. Aby se obdržel (*in order to obtain*) pravděpodobnostní popis výstupních veličin, musíme mít k dispozici pravděpodobnostní popis (*probabilistic description*) vstupů a metody pro stanovení pravděpodobnostního rozložení funkcí náhodné proměnné.

Přechodné jevy v elektrizačních soustavách

Analýza existujících systémů jakož i plánovací proces (*planning process*) pro budování nových zařízení zahrnuje posouzení chování systému v různých podmínkách. Obvyklé metody hodnocení zahrnují výpočty toků výkonů, analýzu zkratových proudů v různých poruchových podmínkách a studie stability.

Elektrizační soustavy zahrnují velké synchronní stroje (*large synchronous machines*) rotující vysokými rychlostmi (*rotating at high speeds*) a propojené (*interconnected*) přenosovými trasami. Korektní provoz systému vyžaduje, aby stroje byly navzájem v synchronismu (aby rotovaly se stejnou úhlovou rychlostí). Pokud se synchronismus ztratí (*if the synchronism is lost*), hrozí ztráta stability (*loss of stability*) systému. Typickým důsledkem ztráty synchronismu je rozsáhlé přerušování dodávky elektřiny. Ke ztrátě synchronismu může dojít poruchou systému, nebo v důsledku prudké změny dodávaného či odebíraného výkonu. Analýza důsledků (*consequence*) systémových poruch patří do oblasti analýzy stability. Poněvadž typy poruch a jejich poloha jsou náhodné proměnné, musí být stabilita systému posuzována pomocí počtu pravděpodobnosti.

Problematika kvality jednotlivých prvků systému

Spolehlivost systému podstatně závisí na kvalitě jeho dílčích prvků. Kontrola kvality těchto prvků ovšem bývá dosti nákladná, zejména tehdy, mají-li příslušné zkoušky destruktivní (*destructive*) charakter. Základní problém, který se v této oblasti musí řešit, je stanovit, kolik a jakých zkoušek (*tests*) je třeba ke garantování (*guarantee*) určité spolehlivosti zařízení.

Zde se rovněž uplatňují metody teorie pravděpodobnosti a jsou dokonce zakotveny v řadě norem (*standards*).

Postupy pro pravděpodobnostní analýzu a návrh

Mnoho problémů lze řešit pomocí elementárních (*elementary*) pravděpodobnostních metod (teorie množin (*set theory*), teorie náhodných proměnných, zpracovávání experimentálních dat). Často se přímo využívají experimentálně zjišťovaná data (histogramy variability (*histograms of variability*) atd.). Ačkoli informace dodaná histogramem nebo funkcí hustoty pravděpodobnosti (*probability density function*) dovoluje výpočet pravděpodobnosti určitých jevů, pro mnohé inženýrské účely (*engineering purposes*) postačí obdržet určité charakteristické atributy (*attributes*) náhodné proměnné (střední hodnotu a rozptyl (*mean value and dispersion*)).

Jakmile stanovíme charakteristiky proměnných pomocí jejich (*in terms of their*) pravděpodobnostního rozdělení (*distribution*), nebo roztrídíme (*classify*) jevy pomocí pravděpodobnosti jejich výskytu (*occurrence*), lze provést pravděpodobnostní analýzu či návrh. Přitom se využívají metody popsané v následujících odstavcích.

Stochastické procesy

Provozní charakteristiky mnoha prvků elektroenergetických systémů a subsystémů lze často klasifikovat v odlišných kategoriích (*different categories*). Tak např. výrobní jednotka (*generation unit*) může být buď v činnosti nebo ve výpadku (*active or on outage*). Stupeň znečištění (*pollution*) izolátorů může být nízký, střední či vysoký. Záloha (*the reserve*) systému může být klasifikována diskrétními hodnotami po x (*in steps of x*) MVA. Jmenované prvky tedy mohou přecházet (*move*) z jednoho stavu do druhého v souladu s (*in accordance with*) určitými zákony pravděpodobnosti (*probability laws*). Bude nás proto zajímat pravděpodobnost a četnost dílčích stavů systému. Přejeme si například znát pravděpodobnost, četnost a dobu trvání případů ztráty dodávky, nebo pravděpodobnost, že určitý vodič se nachází v určitém stupni koroze (*certain state of corrosion*). To se nejlépe modeluje (*this is best modelled*) pomocí Markovových modelů, které byly navrženy pro pravděpodobnostní analýzu systémů s mnoha stavy.

Rozhodovací analýza

Cílem většiny projektantských analýz je poskytnout informace jakožto základ pro rozhodování. Rozhodovací analýza (*decision analysis*) při nejistotách patří k již solidně rozpracovaným oblastem (*fields*) matematiky. Zahrnuje alternativní (*alternative*) řešení a aplikuje zákony pravděpodobnosti při kvantifikaci nejistot. Přitom se uplatňují rozhodovací stromy (*decision trees*), hodnota informací (*value of information*) a další prvky.

Spolehlivost a problémy obsluhy

Energetické systémy jsou typickými případy, kdy se očekává velmi vysoký stupeň spolehlivosti. Zhodnocení spolehlivosti (*reliability evaluation*) je proto důležitým aspektem (*aspect*) pro návrh a provoz systému. V současné době se již uznává (*it is recognised*), že vhodná opatření pro zvýšení spolehlivosti lze popsat jedině v kontextu (*context*) pravděpodobnosti. Vskutku, kompatibilní hladiny pravděpodobnosti v propojených systémech se dosáhnou použitím běžných návrhových kritérií (*design criteria*) založených na vhodně zvolených spolehlivostních požadavcích.

Z hlediska spolehlivosti (*from a reliability viewpoint*) je systém charakterizován mnohými poruchovými módy (*failure modes*) a analýzy těchto poruchových módů patří k základním technikám běžně využívaných v různých studiích. Každý z možných poruchových módů lze analyzovat pomocí chování jednotlivých prvků, jenž může být zapojen v sérii (*in series*),

paralelně (*in parallel*), nebo v kombinaci těchto zapojení. V mnoha případech praktického zájmu lze identifikaci (*identification*) těchto modů zcela zahrnout (*quite involve*) při požadavku systematických postupů pro identifikaci kritických situací a při komplexní analýze důsledků každého z nich.

Na tuto tematiku těsně navazuje analýza politiky údržby (*maintenance policy*) za podmínek nejistoty. Tato politika může mít hluboký vliv na spolehlivost systému a také na finanční situaci společnosti (*company*). Načasování (*timing*) preventivní údržby zařízení zahrnuje kompromis mezi požadavkem na spolehlivou dodávku energie v libovolném okamžiku (*any instant*) a náklady na provádění údržby. Tyto náklady nezahrnují pouze pracovní sílu (*manpower*) a materiál, ale také přemístování zařízení (*replacement costs*) a jejich náhradu (odstraňování (*displacement*) levných výrobních jednotek může být dosti drahé). Cíl je tedy jakási všeobecná optimalizace.

Simulace Monte Carlo

Mnohé energetické systémy vyžadují komplexní modelování a aplikaci speciálních numerických metod pro řešení těchto modelů. Pravděpodobnostní analýza těchto problémů se často stává velice složitou bez podstatných zjednodušení. V takových případech se uplatňuje simulace Monte Carlo (*Monte Carlo simulation*). Jedná se o opakovaný proces (*repeated process*) deterministických (*deterministic*) řešení daného problému, kde každé řešení odpovídá množině deterministických hodnot příslušné náhodné proměnné. Například při pravděpodobnostních výpočtech ustáleného stavu se hodnota zatížení na přípojnicích vybere pomocí vhodného rozložení pravděpodobnosti a poté se použije deterministický program pro rozložení výkonů, který spočte výsledná napětí a toky. Poté se vybere odlišná množina injektovaných výkonů (*injected power*) a získají se nová napětí a nové toky. Proces se opakuje mnohokrát a výsledky se vhodným způsobem zpracují.

Jádrem (*the key part, the core*) simulace Monte Carlo je generace náhodné proměnné z rozložení pravděpodobnosti, které popisuje potřebnou náhodnou proměnnou. Otázka také je, kolikrát se musí celý proces opakovat. Obvykle se jedná o tisícovky, zejména tam, kde se jedná o řídké jevy (*rare events*). Aplikace této metody na složité problémy proto může být nákladná (*costly*). V současné době se zrychlením výpočetní techniky (*computing arts*) ovšem nachází tato metoda svou renesanci.