

Izbira materialov za visokoučinkovite distribucijske transformatorje

Mislav Trbušič¹, Igor Lugarič², Marko Jesenič¹, Mladen Trlep¹ in Anton Hamler¹

¹Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

²Kolektor Etra d.o.o., Šlandrova ulica 10, 1231 Ljubljana-Črnuče, Slovenija

E-pošta: mislav.trbusic@um.si

Material selection for high-efficiency distribution transformers

Abstract. In order to limit CO₂ emissions and reduce the environmental impact of the energy facilities, the European Commission issued Regulation (EU) No. 548/2014 with application of Council Directive 2009/125/ES, which define maximum loss values for small, medium and large power transformers more strictly. Currently, the first stage of the Directive is in force, but after 1.7.2021, the second stage will take place, involving high-efficiency distribution transformers. Such measures require a new approach in the design of the transformers and the use of high-quality electric and magnetic materials. The article analyzes the impact of the Directive to distribution transformers from design and economical aspects, where a case study was carried out involving a three-phase transformer 400 kVA - 21/0,42 kV.

1 Uvod

Energetski transformator, kot ključen element pri prenosu električne energije s svojimi karakteristikami vpliva tako na tehnično kot na ekonomsko in okoljevarstveno plat obratovanja elektroenergetskega sistema, zato je pri načrtovanju transformatorja potrebno upoštevati vse tri omenjene dejavnike [1]. V splošnem je optimalni dizajn dosežen, ko so tehnične zahteve zagotovljene pri najnižjih stroških, v katere je zajeta nabavna cena transformatorja in obratovalni ter vzdrževalni stroški v pričakovani življenjski dobi, ki je med 30 in 40 let [2]. Zaradi vse večjih izzivov povezanih z učinkovito rabo energije, zaščito okolja in omejitvijo izpusta toplogrednih plinov, sta Evropski parlament in Svet izdala Direktivo 2009/125/ES, ki predpisuje dopustni nivo prostotečnih in kratkostičnih izgub glede na tip in moč transformatorja. Izgube so kategorizirane v tri osnovne skupine A, B, in C, pri tem skupina A predstavlja najnižje, skupina C pa najvišje izgube. Proizvajalci transformatorjev, ki želijo svoje izdelke ponujati na EU tržišču, so dolžni upoštevati odredbe komisije. Tako morajo vsi transformatorji izdelani od 1.7.2015 do 1.7.2021 dosegati minimalni nivo izkoristka, določen s prvo stopnjo uredbe (TIER 1), po 1.7.2021 pa nastopa druga stopnja (TIER 2), po kateri bo potrebno izkoristke še izboljšati [3, 4]. V članku je obravnavan vpliv te Direktive na dizajn srednje velikih distribucijskih transformatorjev moči < 3150 kVA in napetostnega nivoja < 24 kV, kjer bo študijski primer predstavljen na 400 kVA

transformatorju. Analiza zajema uporabo različnih materialov in njihov vpliv na končno ceno oziroma strošek transformatorja.

2 Nivoji izgub oljnih transformatorjev

Maksimalne izgube oljnih transformatorjev so s stališča projektiranja in fizikalnih zmožnosti materialov bile določene v standardu EN 50464-S1 (2007) in sicer tako, da so izgube prostega teka bile razdeljene v 5 nivojev (A₀ do E₀), kratkostične izgube pa v 4 nivoje (A_k do D_k). V skladu s smernicami držav Evropske unije, predvsem v smislu doseganja cilja 20/20/20, je bilo potrebno izgube podane v EN 50464-S1 (2007) ponovno opredeliti, kar je storjeno z uredbo Evropske komisije št. 548/2014 o izvajanju Direktive 2009/125/ES.

Tabela 1: Najvišje kratkostične izgube (P_k) in izgube prostega teka (P_0) (v W) za trifazne transformatorje srednjih moči potopljene v tekočino z enim navitjem z $U_m < 24$ kV in drugim navitjem z $U_m < 1,1$ kV [3]

S_n (kVA)	Stopnja 1 (TIER1) od 1.7.2015		Stopnja 2 (TIER2) od 1.7.2021	
	P_k (W) ⁱ⁾ (B _k , C _k)	P_0 (W) ⁱ⁾ (A ₀)	P_k (W) ⁱ⁾ (A _k)	P_0 (W) ⁱ⁾ (A ₀ -10 %)
< 25	900 ⁱⁱⁱ⁾	70	600	63
50	1100 ⁱⁱⁱ⁾	90	750	81
100	1750 ⁱⁱⁱ⁾	145	1250	130
160	2350 ⁱⁱⁱ⁾	210	1750	189
250	3250 ⁱⁱⁱ⁾	300	2350	270
315	3900 ⁱⁱⁱ⁾	360	2800	324
400	4600 ⁱⁱⁱ⁾	430	3250	387
500	5500 ⁱⁱⁱ⁾	510	3900	459
630	6500 ⁱⁱⁱ⁾	600	4600	540
800	8400 ⁱⁱⁱ⁾	650	6000	585
1000	10500 ⁱⁱⁱ⁾	770	7600	693
1250	11000 ⁱⁱⁱ⁾	950	9500	855
1600	14000 ⁱⁱⁱ⁾	1200	12000	1080
2000	18000 ⁱⁱⁱ⁾	1450	15000	1305
2500	22000 ⁱⁱⁱ⁾	1750	18500	1575
3150	27500 ⁱⁱⁱ⁾	2200	23000	1980

ⁱ⁾ Najvišje izgube za nazivne vrednosti v kVA, ki se uvrstijo med nazivne vrednosti v Tabeli 1, se določijo z linearno interpolacijo.

ⁱⁱ⁾ Vrednosti izgub se nanašajo na nivo C_k.

ⁱⁱⁱ⁾ Vrednosti izgub se nanašajo na nivo B_k.

Z Direktivo so v prvi fazi (TIER 1 ali stopnja 1) izločeni najvišji nivoji izgub, za prostotečne izgube je obdržan le najnižji nivo A_0 , medtem ko so za kratkostične izgube dopustna nivoja B_k in C_k , prva stopnja je bila v veljavi do 1.7.2015. Druga stopnja določena z Direktivo (TIER 2), je nastopila 1.7.2021 kjer je v veljavi le najnižji nivo kratkostičnih izgub A_k , maksimalne dopustne izgube prostega teka, pa je potrebno znižati za 10% oz. je potrebno upoštevati $A_0 - 10\%$ [3-5]. Za nazornejši pregled predpisanih maksimalnih izgub oljnih transformatorjev srednjih moči ($S_n < 3150$ kVA in $U_m < 24$ kV), so vrednosti podane v tabeli 1.

3 Ekonomsko ovrednotenje transformatorja

Ekonomsko ovrednotenje transformatorske enote ima močan vpliv na izgube transformatorja in praviloma so le-te določene na podlagi evalvacijskih faktorjev, ki opredeljujejo vrednost izgub v prostem teku X in pod obremenitvijo Y . Evalvacijska faktorja X in Y sta določljiva prek enačb (1) in (2) z upoštevanjem cene električne energije - d [€/kWh], stopnja inflacije - i [%], povprečne rasti cene električne energije - p [%], časa obratovanja - T_N [h], povprečna obremenitev transformatorja - γ [p.u.] in pričakovane življenjske dobe - n [let]. S takšnim pristopom kupec proizvajalcu sporoči, koliko je pripravljen plačati za znižanje vsakega vata izgub [2].

$$X = \frac{T_N d \left[\left(1 + \frac{p}{100}\right)^n - 1 \right]}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^n p} 10^2, \quad [€/W] \quad (1)$$

$$Y = \gamma^2 X, \quad [€/W] \quad (2)$$

Celoten strošek transformatorske enote v življenjski dobi je tako seštevek nabavne cene transformatorja in stroška, ki ga predstavljajo izgube (3). Ker se v tuji literaturi zanj pogosto uporablja izraz »Total Owning Cost« ali krajše TOC , bo tudi tukaj uporabljena ta oznaka. Najbolj ekonomična izbira transformatorja je tista, pri kateri je TOC najmanjši [2].

$$TOC = C_{tr} + X P_0 + Y P_k, \quad [€] \quad (3)$$

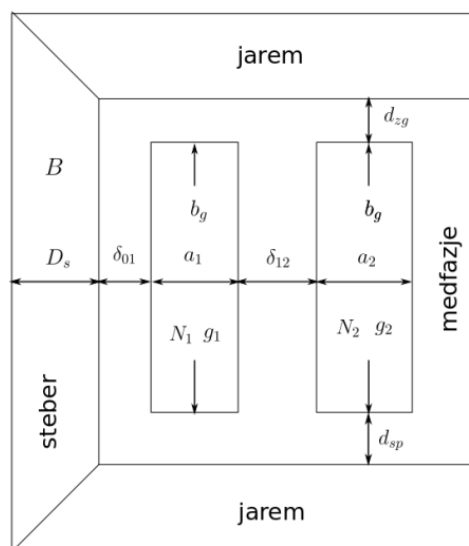
Enačbe (1)-(3) imajo splošno veljavo in se v praksi najpogosteje uporabljajo za določitev izgub transformatorja po t.i. evalvacijski ceni, ker pa so po Direktivi uredbe izgube podane, bo izraz (3) uporabljen le za ekonomsko ovrednotenje transformatorja [2].

Proizvodna cena transformatorja je v principu določena na podlagi stroškov vgrajenega materiala, stroškov dela in marže. Po zakonitostih ekonomike gradnje, je cena vgrajenega materiala sorazmerna masi transformatorja, zato je za kvalitativno oceno, smiselno izraziti ceno transformatorja (4) kot produkt specifične cene - c_{tr} [€/kg] in mase transformatorske enote - m_{tr} [kg], saj se za določen tip in napetostni nivo specifična cena transformatorja spreminja v zelo ozkih mejah in lahko privzamemo, da je konstanta.

$$C_{tr} = c_{tr} m_{tr}, \quad [€] \quad (4)$$

Količina vgrajenega materiala v navitjih in jedru, oziroma konstrukcija aktivnega dela transformatorja je direktno povezana z izgubami. Izkaže se, da se optimalni dizajn dvonavitnega transformatorja lahko poišče z variacijo petih konstrukcijskih parametrov, ki so: B - gostota magnetnega pretoka v jedru [T], D_s - premer magnetnega jedra [mm], g_1 - tokovna gostota v NN navitju, g_2 - tokovna gostota v VN navitju, b_g - geometrijska višina navitij [mm], [6].

Slika 1 kaže transformatorsko okno in principiarno geometrijsko postavitev navitij ene faze, na podlagi katere se z upoštevanjem izgub, kratkostične napetosti (u_k) in nekaterih konstrukcijskih omejitev, lahko določi optimalno geometrijo oziroma maso transformatorja. Podrobnejše zahajanje v tematiko projektiranja transformatorja presega okvir tega članka, zato bodo v nadaljevanju podani le rezultati analize.



Slika 1: Razporeditev navitij v transformatorskem oknu s pripadajočimi oznakami, kjer indeks 1 označuje NN navitje, indeks 2 pa VN navitje

V skladu z Direktivo 2009/125/ES oz. z upoštevanjem izgub v tabeli 1, bodo proizvajalci transformatorjev morali prilagoditi konstrukcijo serijskih distribucijskih transformatorjev tako, da bodo v pogledu izkoristka ustrezali novim, strožjim zahtevam. Z namenom ocene vpliva prihajajočih zahtev na dizajn transformatorja je bila opravljena tehnično-ekonomska analiza, v kateri je bil zajet transformator moči 400 kVA in napetostne prestave 21/0,42 kV. Osnovni cilj analize je številčno ovrednotenje ekonomskih učinkov Direktive z upoštevanjem vpliva uporabe različnih materialov pri izdelavi.

4 Vpliv nižjih izgub na konstrukcijo transformatorja

Analiza vpliva nižjih izgub na konstrukcijo in ekonomiko transformatorja je bila narejena za primer 400 kVA - 21/0,42 kV transformatorja, znotraj katere so bile zajete štiri skupine konstrukcij, ki so vključevale uporabo različnih materialov v navitjih in jedru. Vsaka podana rešitev je rezultat optimizacijskega postopka in predstavlja konstrukcijo transformatorja z najnižjimi stroški znotraj skupine. Posamezna skupina je okarakterizirana z uporabljenim materialom v navitjih in jedru, kjer je material v navitju baker ali aluminij, material v jedru pa lasersko obdelana magnetna pločevina z različnim nivojem izgub in debelino lamel (Tabela 2). Za ekonomsko ovrednotenje oz. za določitev faktorjev X in Y so bili privzeti sledeči parametri: $n=40$ let, $T_n=8760$ h, $i=2$ %, $p=2$ %, $\gamma=0,4$ p.u., $d=0,07$ €/kWh.

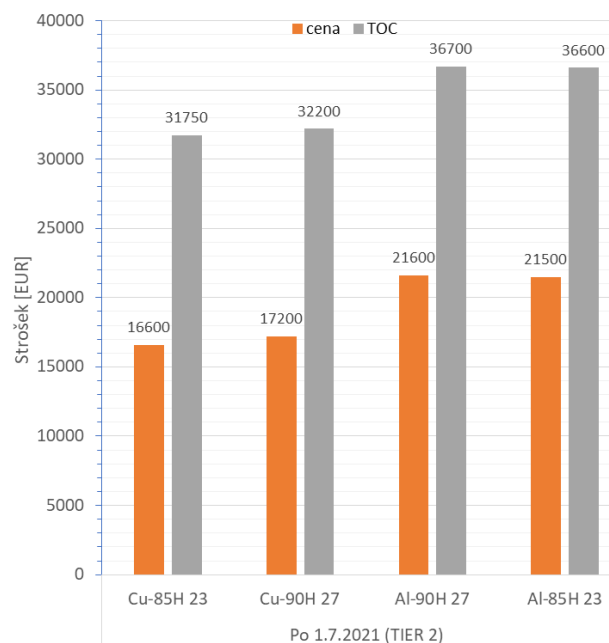
Tabela 2: Tehnični podatki za skupine transformatorskih konstrukcij vključenih v analizo

Naziv	Enota	Cu 85H23	Cu 90H27	Al 90H27	Al 85H23
S_n	[kVA]	400			
U_n	[V]	420/21000			
u_k	[%]	4			
P_0	[W]	387			
P_k	[W]	3250			
Material v navitju [€/kg]		Cu 8,3	Cu 8,3	Al 3	Al 3
Material v jedru [€/kg]		85H 2,8	90H 2,6	90H 2,6	85H 2,8
Specifične izgube @ 1,5 T [W/kg]		0,73	0,76	0,76	0,73
Debelina lamele [mm]		0,23	0,27	0,27	0,23
X	[€/kW]	16774			
Y	[€/kW]	2683			

Na sliki 2 so prikazane optimalne rešitve za posamezne skupine v skladu z delom Direktive, ki se nanaša na najnižje izgube (TIER 2), iz katerih je razvidno, da je najbolj ekonomično izbrati konstrukcijo z bakrenimi vodniki in kvalitetnejšo tanjšo pločevino. Varianta z aluminijem se v tem primeru izkaže za neekonomično.

Z namenom primerjave, je v smislu nabavne cene, TOC-a in mase transformatorja podan kronološki razvoj transformatorjev glede na predpisane izgube (Tabela 3, Slika 3 in Slika 4). Na sliki 3 je razvidno, da se bo z upoštevanjem novih, strožjih omejitev maksimalnih dopustnih izgub (TIER 2), nabavna cena transformatorja povečala za približno 50%, kar je z investicijske plati občutna podražitev, vendar pa ima to le majhen vpliv na stroške transformatorja v življenjski dobi, ki se povečajo za 2,5%, kar predstavlja relativno majhno spremembo. Zaradi nižjih izgub, pa je smiselno pričakovati, da bo

nova generacija transformatorjev težja. Na podlagi obravnavanega primera je na sliki 4 pokazano, da se masa transformatorjev poveča za približno 45%, kar je v skladu z ugotovitvami v [5].

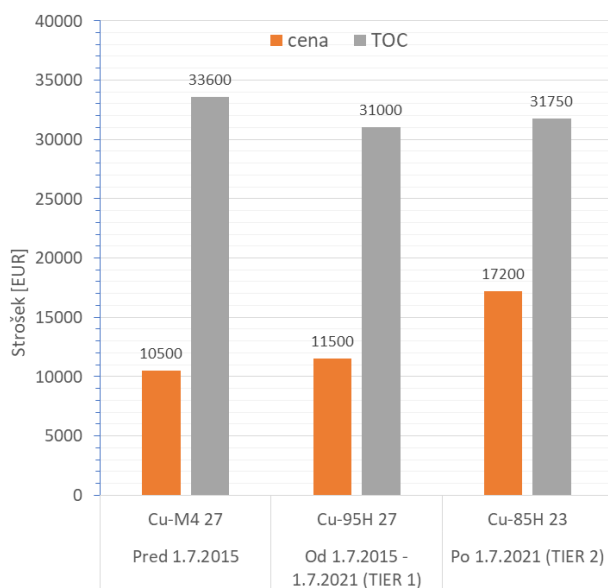


Slika 2: Rezultati analize izbire najprimernejše konstrukcije 400 kVA-21/0,42 kV transformatorja v skladu z TIER 2 (stopnja 2) Direktive 2009/125/ES

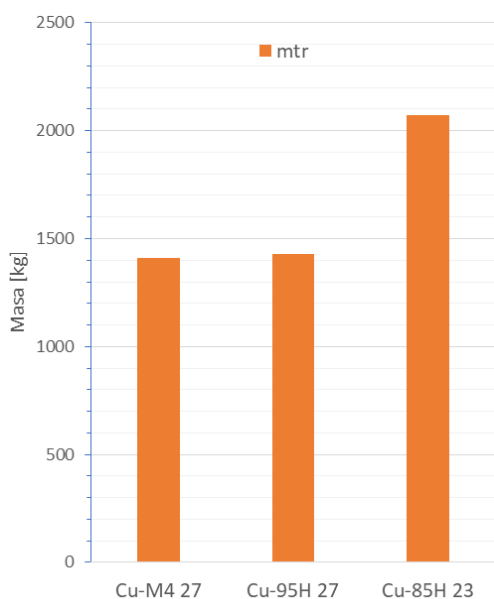
Tabela 3: Tehnični podatki in ekonomski pokazatelji razvoja 400 kVA – 21/0,42 kV transformatorja glede na zahteve po nižanju izgub

Naziv	Enota	EN 50464-S1 (2007) do 1.7.2015	TIER 1 (stopnja 1) 1.7.2015- 1.7.2021	TIER 2 (stopnja 2) od 1.7.2021
X	[€/kW]	16774		
Y	[€/kW]	2683		
P_0	[W]	630 ⁱ⁾	430 ⁱⁱ⁾	387
P_k	[W]	4600 ⁱ⁾	4600 ⁱⁱ⁾	3250
m_{tr}	[kg]	1410 ⁱ⁾	1430 ⁱⁱ⁾	2070
cena	[€]	10500	11500	17200
TOC	[€]	33600	31000	31750

ⁱ⁾ Povzeto iz vira [7] , ⁱⁱ⁾ povzeto iz vira [8].



Slika 3: Primerjava nabavne cene in stroškov transformatorja glede na kronologijo omejevanja najvišjih dopustnih izgub



Slika 4: Masa 400 kVA -21/0,42 kV transformatorja z različnimi izgubami

5 Ugotovitve

Na podlagi rezultatov opravljene analize lahko sklepamo, da bo zaradi zahtev po nizkih izgubah v prihodnjo generacijo serijskih distribucijskih transformatorjev vgrajeno bistveno več materiala. Izračuni kažejo, da se bo teža novih transformatorjev povečala približno za 45%. Čeprav se bo nabavna cena zvišala proporcionalno z maso, pa ta ne bo bistveno vplivala na celotne stroške transformatorja v predvideni življenjski dobi. Rezultati prav tako nakazujejo, da bosta pomembno vlogo v aktivnem delu transformatorja imela baker in kvalitetna lasersko obdelana magnetna pločevina. Uporaba aluminija v navitjih z nastopom

druge stopnje Direktive 2009/125/ES (po 1.7.2021) praktično ne bo več aktualna zaradi prevelikih stroškov proizvodnje, enako velja za uporabo magnetnih pločevin slabše kvalitete, ki bodo z novimi ukrepi izrinjene iz konstrukcij serijskih distribucijskih transformatorjev.

Literatura

- [1] F. Ferrari, »ECODESIGN- Impact of the Directive on materials used and the construction techniques of power transformers«, Proceedings of My Transfo 2018, Torino, 2018.
- [2] »Transformer handbook 3th ed.«, ABB, 2007.
- [3] Evropska komisija, »UREDBA KOMISIJE (EU) št. 548/2014 o izvajanju Direktive 2009/125/ES Evropskega parlamenta in Sveta glede majhnih, srednjih in velikih transformatorjev«, Uradni list Evropske unije, 2014.
- [4] M. Sacotte, »How to optimise the cost of transformer use and save money«, Transformers Magazine, Vol. 6, Issue 3, 2019.
- [5] K. Pongračič, J. Kralj, D. Trstoglavac in M. Mikulić, »Ekološki dizajn distributivnih transformatorja prema uredbi komisije (EU) Br. 548/2014 i Europskoj normi HRN EN 50588-1:2017«, 6. (12.) Savetovanje elektrodistribucijske konferencije-HO CIREC, Opatija, 2018, SO1-01.
- [6] A. Dolenc, »Transformatorji«, Učbenik, Univerza v Ljubljani - Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1970.
- [7] Tehnični katalog Etra 33, Energetski transformatorji d.d. – Distribucijski transformatorji, serije HT3, 6HT3/6VT3 in VT, Ljubljana, 2003
- [8] Tehnični katalog Kolektor Etra – Distribucijski transformatorji, serija 7HTI polnjeni z mineralnim oljem, Ljubljana, 2015

An Impact of Spinning Reserve on the Number of Solutions in the Unit Commitment Problem

Izudin Softić¹, Samed Bajrić², Nedžmija Demirović¹, Emina Hrvic¹, Amila Brčaninović¹

¹Faculty of Electrical Engineering, University of Tuzla, Tuzla, Bosnia and Herzegovina

²Jozef Stefan Institute, Laboratory for Open Systems and Networks, Ljubljana, Slovenia

E-mail: izudin.softic@untz.ba

Abstract. The growing demand for electricity has pushed today's power systems to their safety limits. Under such working conditions, the probability of disturbances has become higher and more likely. Disturbances caused by an imbalance between electricity generation and consumption lead to a deviation of the characteristic values from the nominal values and can lead to a complete or partial collapse of the power systems. To maintain the security of the power system, it is necessary to ensure an adequate level of spinning reserves (SR) in the power system. This paper presents a new approach to reduce the number of solutions in the unit commitment problem (UC) by applying variations with repetition in considering the impact of SR on the security of the power system. The results obtained show a reduced number of solutions and a faster computation time compared to the case when the SR is not considered.

1 Introduction

In any power system, the main problem is a balance between production and consumption at all times, which makes the management of the power system very complicated. At the same time, the complexity of the power system is increasing, and decision-making at the economic and technical level is becoming more and more difficult. Electricity consumption is increasing year by year, which gives the power system an increasingly important role in modern society. To ensure the security of the system from unforeseen changes in consumption and unplanned outages of thermal units, it is necessary to ensure an adequate level of SR in the system. Since the primary goal in solving the UC problem is to minimize the total cost, this may indirectly lead to a reduction in the SR of active power, which is necessary to take corrective safety measures (both in quantitative terms and in terms of appropriate spatial distribution).

The most commonly used methods for solving UC problems are list priority methods [1], dynamic programming method [2], Lagrange relaxation problem [3], Benders decomposition [4]. Some results also include some heuristic methods such as neural networks [5], genetic algorithms [6], and fuzzy logic [7].

2 UC problem formulation

The UC problem aims to minimize the total production cost over the scheduling horizon, taking into account all constraints. Moreover, the total production cost includes fuel costs associated with the operation of the thermal units, as well as start-up and shutdown costs. In this sense, the general form of the UC problem can be described as follows:

$$\min F_{TC} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(t) \cdot u_i(t) + SC_i(t) \cdot v_i(t)] \quad (1)$$

where:

i : Index of thermal unit

t : Hour index

F_{TC} : Total production cost

$F_i(t)$: Fuel cost for thermal unit i at hour t

$u_i(t)$: i -th thermal unit status at hour t

(ON: $u_i(t) = 1$; OFF: $u_i(t) = 0$)

$SC_i(t)$: Start-up cost for thermal unit i

$v_i(t)$: i -th thermal unit start-up/shutdown status at hour t (if the thermal unit started $v_i(t) = 1$, otherwise $v_i(t) = 0$)

N : Number of thermal units

T : Scheduling horizon

The production costs of thermal units show the economic quantification of the MWh produced and are mainly composed of the fuel costs and the operation and maintenance costs incurred in daily operation. For a thermal unit i in a period t , the production cost can be represented as a quadratic function of the output power $P_i(t)$ produced in that period:

$$F_i(t) = a_i + b_i P_i(t) + c_i P_i^2(t) \quad (2)$$

where a_i , b_i and c_i are cost coefficients of the i -th thermal unit.

The start-up costs in thermal units change from some of the highest values when the thermal units start from a completely cold state to considerably lower values when the start-up occurs after the thermal units have cooled down for a short time. In other words, the start-up cost is a function of the boiler cooling time of the boiler and can be presented mathematically in the form

$$SC_i(t) = \begin{cases} hc_i : T_i^{off} \leq X_i^{off}(t) \leq T_i^{off} + cs_i \\ cc_i : X_i^{off}(t) > T_i^{off} + cs_i \end{cases} \quad (3)$$

where:

T_i^{off} : Minimum down time of i -th thermal unit

$X_i^{off}(t)$: Continuous offline period of i -th thermal unit at hour t

hc_i : Hot start-up cost of i -th thermal unit

cc_i : Cold start-up cost of i -th thermal unit

cs_i : Cold start-up hours of i -th thermal unit

Note that if the number of hours less than cs_i we use hot start-up costs otherwise we use cold start-up costs.

In solving the complex UC problem, a few different constraints must be satisfied over a specified short-term period such that the total cost is minimized as follows:

- System power balance – the demand power $P_D(t)$ at hour t should be equal to the sum of the power output of all thermal units and is given by

$$\sum_{i=1}^N P_i(t) = P_D(t) \quad (4)$$

- Spinning reserve – it is an unused part of capacity of thermal unit that is in operation, which can be activated almost immediately (about 10 minutes) in case of problems in the power system, subject to the following conditions

$$\sum_{i=1}^N P_i^{\max}(t) \cdot u_i(t) = P_D(t) + SR(t) \quad \forall t \in T \quad (5)$$

- Minimum up/down time - once a thermal unit is started up/down, it should not be shutdown/run up until a minimum up/down time has been met, and it is expressed as

$$\begin{cases} T_i^{on} \leq X_i^{on}(t) \\ T_i^{off} \leq X_i^{off}(t) \end{cases} \quad (6)$$

- Output limit of thermal units – each thermal unit shall operate within its operating limits between minimum and maximum power output

$$P_i^{\min} \leq P_i(t) \leq P_i^{\max} \quad (7)$$

Having defined the UC problem together with the function of total production cost (1), its components (2) and (3), as well as various constraints (4) – (7), it is necessary to choose an appropriate method for solving the UC problem.

3 Solution methodology

Due to the large number of thermal units with different properties as well as the system dynamics, this is a very complex optimization task. Therefore, research efforts are focused on finding a suitable suboptimal solution to the problem UC that is applicable to real systems, and has moderate computational time and computational resources requirements.

Without the use of an optimization algorithm, it is practically impossible to determine the optimal

distribution due to the extremely large number of possible combinations. The number of combinations of the power generation distribution can be calculated using variations with repetition. Using variations with repetition, we calculate the number of distributions of n different elements at k places, where all elements can be repeated. Moreover, the daily load diagram is characterized by large differences between the minimum and maximum loads, although an attempt is made to keep the load as uniform as possible. At any given time, the production of the thermal unit must be high enough to cover the load. This means that only a small number of variations with repetitions is useful, due to the load's inability to reach its value and the constraints associated with the minimum operating time after start-up and the minimum pause time after shutdown of the thermal units.

Since the operating status of the i -th thermal unit at hour t (ON = 1; OFF = 0) is used in solving the UC problem, we have $n = 2$, while the total number of repeating variations for an hour period is defined by the expression

$$\underbrace{(000\dots00)}_1, \underbrace{(000\dots01)}_2, \dots, \underbrace{(111\dots11)}_{2^k}$$

In order to obtain an optimum or suboptimal solution, the initial solution of the problem is represented by a binary matrix of dimension $T \times N$ where all thermal units are assigned the value 1 (all thermal units are ON) as shown in Table 1.

(4.6) Table 1. Initial solution

	1	2	3	...	N
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
⋮	1	1	1	1	1
T	1	1	1	1	1

Each row vector in the above matrix is representative of the corresponding operating state of a thermal unit in the time interval T and indicates the number of thermal units for which the economic dispatch (ED) is performed. Note that the solution procedure includes the problem ED as a subproblem. That is, for each given row vector, the respective subset should be operated in an optimal economic manner. In this way, the minimum operating cost for that subset can be determined. The *fmincon* solver from MATLAB software is used to solve the ED problem. Further details can be found in [8].

In the first hour, after the process ED, a low-cost solution is adopted and replaced in the first row of the initial solution matrix. Then, it must be checked whether the assumed solution is applicable or not due to all the given constraints. If the solution is applicable, the ED process is continued and run for the second hour. A cost effective solution is adopted and replaced in the second row of the original solution matrix. Again, it has to be