

Ю. О. Варецький

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електроенергетики та систем управління,
e-mail: j.varetsky@gmail.com

В. С. Коновал

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електроенергетики та систем управління,
e-mail: .konoval.volodymyr@gmail.com

ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА ТРАНСФОРМАТОРІВ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ШАХТИ

<https://doi.org/10.23939/sepes2020.01.027>

© Варецький Ю. О., Коновал В. С., 2020

Увімкнення трансформаторів на паралельну роботу потребує врахування кількох важливих вимог. У процесі експлуатації систем електропостачання промислових підприємств іноді виникають ситуації, коли стає бажаним вмикати на паралельну роботу трансформатори, характеристики яких не зовсім відповідають такій процедурі. Якщо трансформатори увімкнено на паралельну роботу, то будь-яка різниця між їхніми параметрами призводить до перерозподілу навантаження між ними порівняно з попереднім режимом, коли вони працювали ізольовано. Розглянуто проблему паралельної роботи трансформаторів різної потужності в системі електропостачання шахти, а також проаналізовано вплив конфігурації системи електропостачання та схем приєднання електроприймачів на розподіл навантажень між трансформаторами.

Ключові слова: система електропостачання, паралельна робота трансформаторів, моделювання, режим роботи, активні та реактивні навантаження, напруга.

Постановка проблеми

Згідно зі стандартом IEEE [1] два чи більше трансформаторів вважають увімкненими на паралельну роботу, якщо вони підключені до *спільних шин навантаження*. До цих шин можуть приєднуватися будь-які типи навантажень, а також конденсаторні батареї, шунтові реактори чи джерела генерування. При цьому первинні обмотки трансформаторів можуть бути підключені до спільних шин або шин, які отримують живлення від різних ліній.

Стандарт окреслює також загальні (ідеальні) вимоги щодо паралельної роботи трансформаторів (т.зв. *general paralleling application* – GPA), коли два чи більше регульованих трансформаторів підключені паралельно до спільних шин джерела живлення:

- коефіцієнти трансформації трансформаторів повинні бути однаковими;
- відносні імпеданси трансформаторів повинні бути однаковими, мати однакове відношення реактансу розсіювання до еквівалентного резистансу обмоток;
- трансформатори повинні мати однакову полярність вторинних обмоток;

- трифазні трансформатори повинні мати однакову послідовність фаз;
- відсутній зсув фаз між напругами вторинних обмоток трансформаторів.

Актуальність дослідження

Очевидно, що у реальних умовах експлуатації практично неможливо забезпечити ці вимоги внаслідок технологічних і режимних характеристик електричних мереж [1–6]. Особливий практичний інтерес представляє проблема паралельної роботи трансформаторів у таких умовах:

- живлення первинних обмоток трансформаторів від різних ліній електропередачі;
- різниця відносних імпедансів паралельних трансформаторів зі зміною коефіцієнтів трансформації.

У цьому випадку паралельна робота трансформаторів повинна забезпечувати вимоги регулювання напруги на шини навантаження та мінімізації струму, який циркулює між ними, внаслідок невідповідних коефіцієнтів трансформації [6]. Причому ці умови повинні забезпечуватися незалежно від змін конфігурації електричної мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблемі паралельної роботи трансформаторів та їх регулювання у цих умовах присвячено значну кількість робіт [1–7], проте автори не виявили в періодичній літературі досліджень, пов'язаних із виявленням впливу конфігурації системи електропостачання та схеми приєднання навантажень на характер розподілу навантажень між трансформаторами.

Формулювання мети та завдань статті

Завданням роботи є дослідження режимів паралельної роботи трансформаторів в діючій системі електропостачання шахти, яка має розгалужену схему приєднання трансформаторних підстанцій до шин зовнішнього електропостачання з використанням струмообмежувальних реакторів. Моделювання режимів роботи системи електропостачання здійснювалося в середовищі програмного комплексу ДАКАР [8].

Виклад основного матеріалу

На рисунку показано фрагмент принципової схеми системи зовнішнього електропостачання діючої шахти. Від шин 110 кВ підстанцій ПС1 і ПС2, які територіально розташовані в різних місцях, здійснюється живлення шахтних електроприймачів через трансформатори Т1 і Т2-Т3. У нормальному режимі роботи від трансформатора Т1 отримують живлення трансформаторні підстанції ТП1...ТП6, приєднані до шин розподільного пристрою Р1 (секція шин С1), і трансформаторні підстанції ТП7...ТП11, приєднані до шин розподільного пристрою Р2 (секція шин С2).

Від трансформатора Т3 отримують живлення трансформаторні підстанції ТП12...ТП16, приєднані до шин розподільного пристрою Р2 (секція шин С1). Шиноз'єднувальний вимикач ШЗВ у нормальному режимі роботи вимкнений. Сумарне навантаження трансформатора Т1 у цих умовах змінюється в межах від 6 до 16 МВА з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi = 0,82$. Розподіл сумарного навантаження трансформатора Т1 між розподільними пристроями Р1 і Р2 в експлуатаційних режимах роботи шахти може змінюватися у співвідношеннях від 20 %:80 % до 80 %:20 %, відповідно. Навантаження трансформатора Т3 залишається сталим – 1,2 МВА з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi = 0,9$.

Дослідженнями передбачено вивчити можливість тимчасової паралельної роботи трансформаторів Т1 і Т3 в експлуатаційних режимах роботи шахти з метою забезпечення перемикання між секціями шин розподільного пристрою Р2 відповідальних електроприймачів без припинення їх живлення. Особливістю системи електропостачання є наявність в її структурі струмообмежувальних реакторів R1 і R2, які впливають на розподіл навантаження між трансформаторами Т1 і Т3 під час їх паралельної роботи. У табл. 1 і 2 наведено паспортні дані трансформаторів і реакторів досліджуваної системи електропостачання.

Таблиця 3

Режими роботи трансформаторів Т1 і Т3 при максимальному навантаженні трансформатора Т1 і співвідношенні навантажень розподільних пристроїв Р1 і Р2 – $\underline{S}_{P1} = \underline{S}_{P2}$ (максимальний режим роботи мережі 110 кВ)

№ з/п	Стан вимикача ШЗВ	Напруга на шинах С1, РП Р2 U_{C1} , кВ	Напруга на шинах С2, РП Р2 U_{C2} , кВ	Струм ШЗВ $I_{ШЗВ}$, А	Навантаження трансформатора Т1		Навантаження трансформатора Т3	
					I , А	$P+jQ$, МВА	I , А	$P+jQ$, МВА
1	вимкнено	$6,23e^{-j2,8^\circ}$	$6,15e^{-j10,0^\circ}$	0	1403	$13,73+j7,48$	95	$0,90+j0,50$
2	увімкнено	$6,17e^{-j7,0^\circ}$	$6,17e^{-j7,0^\circ}$	343	1124	$10,03+j7,55$	425	$4,55+j0,04$
3	вимкнено	$6,08e^{-j2,8^\circ}$	$6,15e^{-j10,0^\circ}$	0	1403	$13,73+j7,48$	98	$0,90+j0,50$
4	увімкнено	$6,10e^{-j7,0^\circ}$	$6,10e^{-j7,0^\circ}$	357	1132	$10,09+j8,31$	429	$4,50-j0,64$

У цій та всіх наступних таблицях рядки з непарними номерами належать до вибраних параметрів режиму роботи мережі за умови, що трансформатори Т1 та Т3 працюють роздільно. Рядки з парними порядковими числами належать до таких самих величин, коли трансформатори Т1 та Т3 увімкнені на паралельну роботу.

Таблиця 4

Режими роботи трансформаторів Т1 і Т3 за максимального навантаження трансформатора Т1 і співвідношення навантажень розподільних пристроїв – $\underline{S}_{P1} = \underline{S}_{P2}$ (мінімальний режим роботи мережі 110 кВ)

№ з/п	Стан вимикача ШЗВ	Напруга на шинах С1, РП Р2 U_{C1} , кВ	Напруга на шинах С2, РП Р2 U_{C2} , кВ	Струм ШЗВ $I_{ШЗВ}$, А	Навантаження трансформатора Т1		Навантаження трансформатора Т3	
					I , А	$P+jQ$, МВА	I , А	$P+jQ$, МВА
5	вимкнено	$6,30e^{-j1,7^\circ}$	$6,23e^{-j8,8^\circ}$	0	1384	$13,72+j7,46$	94	$0,90+j0,50$
6	увімкнено	$6,25e^{-j5,8^\circ}$	$6,25e^{-j5,8^\circ}$	343	1108	$9,99+j7,56$	423	$4,59+j0,02$

Порівнюючи рядки 1,2 (табл. 3) і 5,6 (табл. 4) для випадку, коли співвідношення напруг на контактах шиноз'єднувального вимикача (ШЗВ) розподільного пристрою Р2 до їх замикання відповідає умові ($U_{C1} > U_{C2}$), можемо констатувати, що режим роботи мережі 110 кВ не має помітного впливу на перетоки потужності після увімкнення трансформаторів на паралельну роботу. Разом з тим, рівень напруг на контактах цього вимикача перед увімкненням трансформаторів на паралельну роботу змінює характер перетоків потужності. Порівнюючи рядки 1–2 та 3–4 (табл. 3), бачимо, що реактивне навантаження трансформатора Т3 змінюється з індуктивного на ємнісне, що пояснюється протіканням циркулюючих струмів між трансформаторами Т1 і Т3. В інших робочих режимах системи, як показали розрахунки, спостерігаються більші значення змін реактивної потужності. Загалом, увімкнення трансформаторів Т1 і Т3 на паралельну роботу призводить до зміни їх навантаження. Після увімкнення на паралельну роботу трансформатор Т1 буде розвантажений, а трансформатор Т3 – довантажений. Якщо відповідно до прийнятих умов роботи трансформатори під час розділеної роботи за умови $U_{C1} > U_{C2}$ були навантажені потужностями з такими значеннями:

$$T1 - 13,73+j7,48 = 15,64e^{j29^\circ} \text{ МВА};$$

$$T3 - 0,9+j0,5 = 1,03e^{j29^\circ} \text{ МВА},$$

то після увімкнення шиноз'єднувального вимикача ці потужності зміняться до значень:

$$T1 - 10,03+j7,55 = 12,55e^{j37^\circ} \text{ МВА};$$

$$T3 - 4,55+j0,04 = 4,55e^{j0,5^\circ} \text{ МВА}.$$

На підставі проведених розрахунків можна зробити висновок, що за умови взятих співвідношень напруг на контактах вимикача перед його ввімкненням та заданих значеннях навантажень розподільних пристроїв P1 та P2 можна допустити паралельну роботу трансформаторів T1 і T3 в аналізованій мережі.

Аналіз впливу початкового навантаження трансформатора T1. У табл. 5 наведено результати розрахунків для режиму мінімального навантаження мережі 6 кВ за умови рівномірного розподілу навантаження трансформатора T1 ($\underline{S}_{T1}$) між розподільними пристроями P1 ($\underline{S}_{P1}$) і P2 ($\underline{S}_{P2}$) та можливими співвідношеннями напруги на контактах шиноз'єднувального вимикача розподільного пристрою P2 перед його ввімкненням.

З табл. 5 можемо отримати наступні значення навантаження трансформаторів: перед увімкненням ШЗВ:

$$T1 - 5,42 + j2,73 = 6,07e^{j28^\circ} \text{ MVA};$$

$$T3 - 0,9 + j0,5 = 1,03e^{j29^\circ} \text{ MVA},$$

після увімкнення ШЗВ:

$$U_{C1} \approx U_{C2} \quad T1 - 4,23 + j3,01 = 5,19e^{j36^\circ} \text{ MVA};$$

$$T3 - 2,09 + j0,17 = 2,10e^{j5^\circ} \text{ MVA},$$

$$U_{C1} < U_{C2} \quad T1 - 4,51 + j4,96 = 6,70e^{j48^\circ} \text{ MVA};$$

$$T3 - 1,84 - j1,68 = 2,49e^{-j42^\circ} \text{ MVA},$$

$$U_{C1} > U_{C2} \quad T1 - 3,89 + j0,54 = 3,93e^{j8^\circ} \text{ MVA};$$

$$T3 - 2,44 + j2,60 = 3,57e^{j47^\circ} \text{ MVA}.$$

Таблиця 5

Режими роботи трансформаторів T1 і T3 за мінімального навантаження трансформатора T1 і співвідношення навантажень розподільних пристроїв – $\underline{S}_{P1} = \underline{S}_{P2}$

№ з/п	Стан вимикача ШЗВ	Напруга на шинах C1, РП P2 U_{C1} , кВ	Напруга на шинах C2, РП P2 U_{C2} , кВ	Струм ШЗВ $I_{ШЗВ}$, А	Навантаження трансформатора T1		Навантаження трансформатора T3	
					I , А	$P + jQ$, МВА	I , А	$P + jQ$, МВА
7	вимкнено	$6,17e^{-j1,4^\circ}$	$6,19e^{-j3,7^\circ}$	0	556	$5,42 + j2,73$	96	$0,90 + j0,50$
8	увімкнено	$6,17e^{-j2,8^\circ}$	$6,17e^{-j2,8^\circ}$	115	476	$4,23 + j3,01$	195	$2,09 + j0,17$
9	вимкнено	$6,01e^{-j1,4^\circ}$	$6,42e^{-j3,6^\circ}$	0	536	$5,42 + j2,71$	99	$0,90 + j0,50$
10	увімкнено	$6,23e^{-j2,9^\circ}$	$6,23e^{-j2,9^\circ}$	220	600	$4,51 + j4,96$	230	$1,84 - j1,68$
11	вимкнено	$6,49e^{-j1,4^\circ}$	$5,96e^{-j3,9^\circ}$	0	577	$5,42 + j2,74$	92	$0,90 + j0,50$
12	увімкнено	$6,16e^{-j2,7^\circ}$	$6,16e^{-j2,7^\circ}$	242	368	$3,89 + j0,54$	333	$2,44 + j2,60$

За результатами розрахунків можна зробити висновок, що найменше навантаження трансформатора T3 після увімкнення вимикача ШЗВ матимемо у випадку приблизно однакових модулів напруг на контактах вимикача перед його ввімкненням ($U_{C1} \approx U_{C2}$). Якщо співвідношення між модулями напруг на контактах вимикача задовольняє умову $U_{C1} < U_{C2}$, навантаження трансформатора T3 збільшується після вмикання вимикача ШЗВ; при цьому збільшується також навантаження трансформатора T1 внаслідок зміни характеру розподілу реактивної потужності між трансформаторами T1 і T3, яка додатково завантажує трансформатор T1. В останньому випадку, коли маємо співвідношення між модулями напруг на контактах ($U_{C1} > U_{C2}$), спостерігаємо найбільше навантаження трансформатора T3 після ввімкнення вимикача ШЗВ і найменше навантаження трансформатора T1.

У табл. 6 наведено результати розрахунків для максимального навантаження мережі 6 кВ за умови взятих у попередньому випадку значень розподілу навантаження між розподільними пристроями P1, P2 та співвідношень напруг на контактах вимикача ШЗВ перед його ввімкненням.

Таблиця 6

Режими роботи трансформаторів Т1 і Т3 за максимального початкового навантаження трансформатора Т1 і співвідношення навантажень розподільних пристроїв – $\underline{S}_{P1} = \underline{S}_{P2}$

№ з/п	Стан вимикача ШЗВ	Напруга на шинах С1, РП Р2 U_{C1} , кВ	Напруга на шинах С2, РП Р2 U_{C2} , кВ	Струм ШЗВ $I_{ШЗВ}$, А	Навантаження трансформатора Т1		Навантаження трансформатора Т3	
					I , А	$P+jQ$, МВА	I , А	$P+jQ$, МВА
13	вимкнено	$6,49e^{-j1,7^\circ}$	$6,0e^{-j9,1^\circ}$	0	1437	$13,73+j7,53$	92	$0,90+j0,50$
14	увімкнено	$6,18e^{-j5,8^\circ}$	$6,18e^{-j5,8^\circ}$	377	1030	$9,79+j5,82$	472	$4,78+j1,67$
15	вимкнено	$5,99e^{-j1,7^\circ}$	$6,35e^{-j8,6^\circ}$	0	1360	$13,72+j7,43$	99	$0,90+j0,50$
16	увімкнено	$6,16e^{-j5,9^\circ}$	$6,16e^{-j5,9^\circ}$	399	1243	$10,21+j9,72$	449	$4,40-j1,92$

Для аналізованого випадку:
перед увімкненням ШЗВ:

$$\begin{aligned} T1 - 13,73+j7,43 &= 15,64e^{j29^\circ} \text{ МВА}; \\ T3 - 0,9+j0,5 &= 1,03e^{j29^\circ} \text{ МВА}, \end{aligned}$$

після увімкнення ШЗВ:

$$\begin{aligned} U_{C1} < U_{C2} \quad T1 - 10,21+j9,72 &= 14,10e^{j44^\circ} \text{ МВА}; \\ T3 - 4,40 - j1,92 &= 4,80e^{-j24^\circ} \text{ МВА}, \\ U_{C1} > U_{C2} \quad T1 - 9,79+j5,82 &= 11,39e^{j31^\circ} \text{ МВА}; \\ T3 - 4,78+j1,67 &= 5,06e^{j19^\circ} \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Під час максимального навантаження мережі 6 кВ та рівного розподілу навантаження трансформатора Т1 між розподільними пристроями Р1 та Р2 можемо спостерігати подібні до попереднього випадку тенденції розподілу навантаження після замикання контактів шиноз'єднувального вимикача, але тут збільшується навантаження трансформатора Т3.

У табл. 7 наведено результати розрахунків для максимального навантаження мережі 6 кВ за умови розподілу навантаження трансформатора Т1 між розподільними пристроями Р1 та Р2 у співвідношенні 20 % та 80 % відповідно.

Таблиця 7

Режими роботи трансформаторів Т1 і Т3 за максимального початкового навантаження трансформатора Т1 і співвідношення навантажень розподільних пристроїв

$$\underline{S}_{P1} = 0,2\underline{S}_{T1}, \underline{S}_{P2} = 0,8\underline{S}_{T1}$$

№ з/п	Стан вимикача ШЗВ	Напруга на шинах С1, РП Р2 U_{C1} , кВ	Напруга на шинах С2, РП Р2 U_{C2} , кВ	Струм ШЗВ $I_{ШЗВ}$, А	Навантаження трансформатора Т1		Навантаження трансформатора Т3	
					I , А	$P+jQ$, МВА	I , А	$P+jQ$, МВА
17	вимкнено	$6,30e^{-j1,7^\circ}$	$5,88e^{-j10,2^\circ}$	0	1447	$13,58+j7,44$	94	$0,90+j0,50$
18	увімкнено	$6,10e^{-j6,5^\circ}$	$6,10e^{-j6,5^\circ}$	423	1007	$9,10+j6,35$	517	$5,29+j1,29$
19	вимкнено	$5,99e^{-j1,7^\circ}$	$6,24e^{-j9,7^\circ}$	0	1366	$13,56+j7,78$	99	$0,90+j0,50$
20	увімкнено	$6,11e^{-j6,5^\circ}$	$6,11e^{-j6,5^\circ}$	432	1243	$9,46+j9,55$	492	$4,97-j1,60$

У цьому випадку маємо такі навантаження трансформаторів після увімкнення вимикача ШЗВ:

$$\begin{aligned} U_{C1} < U_{C2} \quad T1 - 9,46+j9,55 &= 13,44e^{j45^\circ} \text{ МВА}; \\ T3 - 4,97 - j1,60 &= 5,22e^{j18^\circ} \text{ МВА}, \\ U_{C1} > U_{C2} \quad T1 - 9,10+j6,35 &= 11,10e^{j35^\circ} \text{ МВА}; \\ T3 - 5,29+j1,29 &= 5,45e^{j14^\circ} \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Бачимо, що для цих співвідношень розподілу навантаження трансформатора Т1 суттєво зростає навантаження трансформатора Т3.

У табл. 8 наведено результати розрахунків для максимального навантаження мережі 6 кВ, коли навантаження трансформатора Т1 поділено між розподільними пристроями Р-1 та Р-2 у співвідношенні 80 % та 20 %.

Таблиця 8

Режими роботи трансформаторів Т1 і Т2 за максимального початкового навантаження трансформатора Т1 і співвідношення навантажень розподільних пристроїв – $\underline{S}_{P1} = 0,8\underline{S}_{T1}$, $\underline{S}_{P2} = 0,2\underline{S}_{T1}$

№ з/п	Стан вимикача ШЗВ	Напруга на шинах С1, РП Р2 U_{C1} , кВ	Напруга на шинах С2, РП Р2 U_{C2} , кВ	Струм ШЗВ $I_{ШЗВ}$, А	Навантаження трансформатора Т1		Навантаження трансформатора Т3	
					I , А	$P+jQ$, МВА	I , А	$P+jQ$, МВА
21	вимкнено	$6,15e^{-j1,7^\circ}$	$6,12e^{-j7,7^\circ}$	0	1396	$13,50+j7,11$	97	$0,90+j0,50$
22	увімкнено	$6,12e^{-j5,2^\circ}$	$6,12e^{-j5,2^\circ}$	294	1165	$10,39+j7,38$	376	$3,99+j0,02$
23	вимкнено	$6,31e^{-j1,7^\circ}$	$6,0e^{-j7,8^\circ}$	0	1422	$13,50+j7,14$	94	$0,90+j0,50$
24	увімкнено	$6,12e^{-j5,1^\circ}$	$6,12e^{-j5,1^\circ}$	311	1102	$10,24+j6,13$	405	$4,12+j1,22$
25	вимкнено	$6,0e^{-j1,7^\circ}$	$6,34e^{-j7,5^\circ}$	0	1346	$13,49+j7,07$	99	$0,90+j0,50$
26	увімкнено	$6,16e^{-j5,2^\circ}$	$6,16e^{-j5,2^\circ}$	342	1260	$10,61+j9,27$	389	$3,78-j1,75$

Для таких співвідношень розподілу навантаження трансформатора Т1 отримаємо:

$$U_{C1} < U_{C2} \quad T1 - 10,61+j9,27 = 14,09e^{j41^\circ} \text{ МВА};$$

$$T3 - 3,78 - j1,75 = 4,17e^{-j25^\circ} \text{ МВА},$$

$$U_{C1} > U_{C2} \quad T1 - 10,24+j6,13 = 11,94e^{j31^\circ} \text{ МВА};$$

$$T3 - 4,12+j1,22 = 4,30e^{j16^\circ} \text{ МВА}.$$

Порівняно з попереднім випадком розподілу навантаження трансформатора Т1 бачимо зниження навантаження трансформатора Т3.

Висновки

В аналізованій системі електропостачання шахти в межах можливих змін напруги на шинах розподільних пристроїв 6 кВ і робочих змін навантажень допускається паралельна робота трансформаторів Т1 і Т3. Після ввімкнення на паралельну роботу трансформатор Т1 буде розвантажуватися, а трансформатор Т3 довантажуватися порівняно з їх розділеною роботою. Характер розподілу потужності між трансформаторами залежить від значень напруги на контактах шиноз'єднувального вимикача перед їх увімкненням на паралельну роботу. Максимальне навантаження трансформатора Т3 під час паралельної роботи не перевищує 87 % від його номінальної потужності.

Мінімальні значення струмів, що циркулюють між паралельно ввімкненими трансформаторами, будуть за близьких значень модулів напруг на контактах вимикача перед його ввімкненням. Рівень завантаження трансформатора Т3 під час паралельної роботи трансформаторів залежить від розподілу навантаження трансформатора Т1 між розподільними пристроями Р1 та Р2. Чим більшим буде відносне навантаження розподільного пристрою Р1, тим меншим буде додаткове навантаження трансформатора Т3.

Список використаних джерел

1. IEEE Std C57.153™-2015. IEEE Guide for Paralleling Regulating Transformers. 107 P.
2. Introduction to Paralleling of LTC Transformers by the Circulating Current Method, Tapchanger Control Application Note #11, Beckwith Electric Co., Inc., February 1998.
3. Harlow J. H. LTC Control and Transformer Paralleling. The Electric Power Engineering Handbook, CRC Press LLC, 2000, pp. 3-135–3-148.

4. Harlow J. H., *Electric Power Transformer Engineering*, 2nd ed., CRC Press, 2007, Chap. 17, – Load-Tap-Change Control and Transformer Paralleling.
5. *Loading Considerations when Paralleling Transformers*. Ed Zientek, PE. Schneider Electric USA, Inc. October 2011. 17 P.
6. Jauch E. T., *Factors in Choosing Transformer Paralleling Methods* // *Proc. of 2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition* Note, Beckwith Electric Co., Inc., July 2006. P. 1–6.
7. Hampson B. *Power System Operation and Control Solutions Using IEC 61850*. *Proc. of 22nd Conference of the Electric Power Supply Industry*. Kuala Lumpur, September 17–22, 2018, pp. 1–15.
8. *Power design and analysis solution – DAKAR*, www.dakar.eleks.com.

References

1. IEEE Std C57.153™-2015. *IEEE Guide for Paralleling Regulating Transformers*. 107 P.
2. *Introduction to Paralleling of LTC Transformers by the Circulating Current Method*, Tapchanger Control Application Note #11, Beckwith Electric Co., Inc., February 1998.
3. Harlow J. H. *LTC Control and Transformer Paralleling*. *The Electric Power Engineering Handbook*, CRC Press LLC, 2000, pp. 3-135–3-148.
4. Harlow J. H., *Electric Power Transformer Engineering*, 2nd ed., CRC Press, 2007, Chap. 17. Load-Tap-Change Control and Transformer Paralleling.
5. *Loading Considerations when Paralleling Transformers*. Ed Zientek, PE. Schneider Electric USA, Inc. October 2011. 17 P.
6. Jauch E. T., *Factors in Choosing Transformer Paralleling Methods* // *Proc. of 2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition* Note, Beckwith Electric Co., Inc., July 2006. P. 1–6.
7. Hampson B. *Power System Operation and Control Solutions Using IEC 61850*. *Proc. of 22nd Conference of the Electric Power Supply Industry*. Kuala Lumpur, September 17–22, 2018, pp. 1–15.
8. *Power design and analysis solution – DAKAR*, www.dakar.eleks.com.

Y. Varetsky

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Power Engineering and Control Systems,
e-mail: j.varetsky@gmail.com

V. Konoval

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Power Engineering and Control Systems,
e-mail: konoval.volodymyr@gmail.com

PARALLEL OPERATION OF TRANSFORMERS WITHIN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF A MINE

© Varetsky Y., Konoval V., 2020

Connecting transformers in parallel requires a few of important requirements. During operation of the industrial supply power systems, there are sometimes situations when it becomes desirable to operate of parallel transformers, the characteristics of which do not quite correspond to such a procedure. When transformers are connected in parallel, any difference between their parameters causes the load to be redistributed between them compared to the previous operating mode they had been operating in isolation. The paper deals with the problem of different capacity transformers paralleling within the mine power supply system, and also analyzes the impact of the power supply system configuration and connection diagram of electric consumers on the load distribution between the transformers.

According to the IEEE Standard C57.153™-2015, two or more transformers connected to common load buses should be considered as operating in parallel. All types of load, as well as capacitor banks, shunt reactors, or power sources can be connected to those buses. The primary windings of the transformers can be connected to common buses or buses that receive power from different lines.

The IEEE Standard also describes general requirements to the paralleling transformers -general paralleling application (GPA) – when two or more regulated transformers are connected in parallel to the common source buses:

- transformer ratios should be the same.
- relative impedances of transformers should be the same and should have the same ratio of the reactance to the equivalent resistance of the windings.
- transformers should have the same polarity of the secondary windings.
- three-phase transformers should have the same phase sequence.
- there should be no phase shift between the voltages of the secondary windings of the transformers.

Obviously, under actual operating conditions, it is almost impossible to meet the described requirements due to possible differences in characteristics of the transformers and configurations of the electrical networks. The problem of parallel operation of transformers under the following conditions is of particular practical interest:

- power supply of transformer primary windings from different power lines.
- difference of relative impedances of parallel transformers under change of transformer ratios.

In this case, the parallel operation of transformers should meet the requirements of voltage control on the load buses and minimize the circulating current due to inappropriate transformer ratios. Also, these conditions should be provided regardless of the power system configuration changes.

A lot of studies are dedicated to the problem of paralleling power transformers and their control. But the authors did not find the studies concerning the impact of the power supply system configuration and the loads connection layout on loading the paralleled transformers.

The paper discusses paralleling transformers in the existing mine power supply system, having a complex circuit configuration of connecting the loads to substation buses using current limiting reactors. Modeling of the power supply system operating conditions has been carried out on the platform of the DAKAR software.

Through simulation results it can be concluded, that in the analysed mine power supply system within the operating voltage limits at the buses of the 6 kV switchgears and the operating load changes, it is feasible paralleling transformers T1 and T3. Under the parallel operation, transformer T1 will be unloaded and transformer T3 will be more loaded compared to their separate operation. The nature of the load sharing between the transformers depends on the voltage moduli on the contacts of the busbar switch before switching it on. The maximum load of the transformer T3 under the parallel operation does not exceed 87% of its rated capacity.

The minimum values of circulating currents between transformers operating in parallel will in case of close value of voltage moduli at the contacts of the bus circuit breaker before switching it on. The load of the transformer T3 under the paralleling transformers depends on the load sharing between the switchgears P1 and P2 of the transformer T1. The greater the relative load of the switchgear P1, the lower the additional load on the transformer T3.

Keywords: power supply system, paralleling transformers, modeling, operating mode, active and reactive loads, voltage.