

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ЯВИЩ ПРИ ВМИКАННІ В МЕРЕЖУ 0,38 КВ БАТАРЕЙ КОНДЕНСАТОРІВ ПОПЕРЕЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ

А. О. Омельчук, кандидат технічних наук, доцент

Д. Г. Дерев'янка, кандидат технічних наук, доцент

В. В. Ткаченко, кандидат технічних наук, доцент

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»*

E-mail: omelchuk_anatoli@ukr.net

Анотація. Розглянуті питання роботи конденсаторних батарей у складі регульованих конденсаторних установок, підключених в електричній мережі 0,38 кВ силових трансформаторів споживчих підстанцій 10/0,4 кВ. Відомо, що конденсаторні батареї використовуються для компенсації реактивної потужності електроприймачів та вирівнювання навантаження фаз в трифазних чотирипровідних мережах 0,30 кВ шляхом створення струмів зворотної послідовності рівних за величиною, але повернутих на 180° відносно струмів навантаження за рахунок включення різної кількості конденсаторів між фазами мережі.

Широка присутність в електричних мережах нелінійних електроприймачів обумовлює виникнення вищих гармонічних складових напруги і струму, які викликають підвищення струму в конденсаторах, оскільки реактивний опір конденсаторів зі зростанням частоти зменшується. Одночасно зі зростанням струму в конденсаторах, який можна регулювати за допомогою конструктивних заходів, в несприятливих випадках у мережах можуть виникнути резонансні явища. Широке впровадження конденсаторних батарей створює ризики виникнення резонансу напруг і струмів як при основній частоті трифазного змінного струму 50 Гц, так і при частотах 150, 250, 350 і 550 Гц, обумовлених вищими гармонічними складовими напруги і струму.

Отримані результати свідчать про те, що для виникнення резонансу струмів на основній частоті для силових трансформаторів різних потужностей потужність батарей конденсаторів повинна складати від $0,02 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}$ на $1 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ потужності (для трансформатора 630 кВ·А) до $0,034 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}$ (для трансформатора 25 кВ·А), а для виникнення резонансу напруги відповідно від $18,7 \text{ кВ} \cdot \text{Ар/кВ} \cdot \text{А}$ до $26 \text{ кВ} \cdot \text{Ар/кВ} \cdot \text{А}$.

Окрім того, розрахунки показують, що для підвищення коефіцієнта потужності навіть на малу величину (від 0,9 до 0,95) необхідно встановлювати батареї конденсаторів не менше $0,14 \text{ кВ} \cdot \text{Ар/кВ} \cdot \text{А}$, а для збільшення коефіцієнта потужності від 0,7 до 0,95 – всього $0,66 \text{ кВ} \cdot \text{Ар/кВ} \cdot \text{А}$.

Ключові слова: конденсаторні батареї, силові трансформатори, ємність,

індуктивність, резонанс напруг і струмів, добротність контуру

Актуальність. Реактивні перетікання в електричних мережах викликають додаткові втрати напруги і збільшують втрати електроенергії в цих мережах. Основним способом зменшення реактивних перетікань в електричних мережах є встановлення джерел цієї потужності якомога ближче до споживачів або в електричних мережах. За [1, 3] в якості джерел реактивної потужності біля споживачів і в електричних мережах рекомендуються регульовані конденсаторні батареї. При цьому потужність цих батарей для споживачів вибирається за умовою мінімальної оплати за реактивні перетікання та максимального дисконтованого доходу для електричних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Місце встановлення регульованих конденсаторних батарей визначається техніко-економічним обґрунтуванням. Але при встановленні їх на стороні 0,38 кВ споживчих трансформаторних підстанцій зменшуються перетікання реактивної потужності у всіх колах електричної мережі. Результати розрахунків показують ефективну компенсацію реактивної потужності на вводах споживачів або на шинах 0,4 кВ споживчих ТП 10/0,4 кВ.

При вмиканні конденсаторних батарей в мережах 0,38 кВ внаслідок наявності індуктивності трансформаторів, ліній електропередачі і електроприймачів в колах можуть виникати резонанси струмів і напруг як на основній частоті, так і на вищих частотах, що може привести до недопустимого підвищення напруги і струму і виходу з ладу як конденсаторних батарей, так і окремих електроприймачів.

Дослідження виконані для випадків встановлення конденсаторних батарей на шинах 0,4 кВ споживчих ТП 10/0,4 кВ при відсутності електричного навантаження, тобто без врахування активних і реактивних опорів ліній електропередачі 0,38 кВ і опорів навантаження.

Метою дослідження є:

- визначення опорів елементів схеми заміщення силового трансформатора на основі його паспортних даних;
- визначення потужності (ємності) конденсаторної батареї, при котрій виникає

резонанс струмів або напруг на основній частоті 50 Гц;

- визначення потужності (ємності) конденсаторної батареї для виникнення резонансу напруг на частотах вищих порядків, кратних основній;
- розрахунок резонансних частот і резонансних кривих напруги на ємності;
- побудова резонансних кривих і визначення зростання напруги на батареї конденсаторів при різних частотах.

Матеріали і методи дослідження. Розрахунки виконані для шкали потужностей трансформаторів 10/0,4 кВ від 25 до 630 кВ·А. Потужності окремих конденсаторних батарей прийняті стандартними зі співвідношенням потужностей секцій 1:2 та 1:2:4.

Методика дослідження та аналітичні залежності для розрахунку резонансних явищ при вмиканні конденсаторних батарей в мережах 0,38 кВ така.

Для однофазного силового трансформатора з коефіцієнтом трансформації $K=1$ або для однієї фази трифазного трансформатора найбільш точною є така схема заміщення:

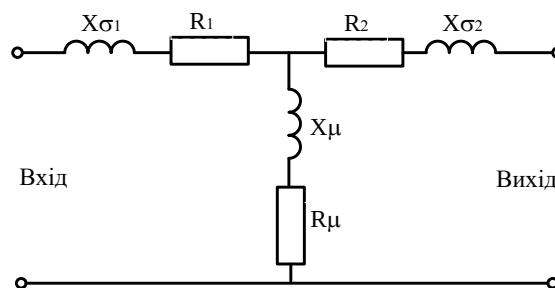


Рис.1. Схема заміщення однофазного (однієї фази трифазного) силового трансформатора

Параметри елементів схеми заміщення визначаються за паспортними даними або за результатами вимірювання. Для силових трансформаторів з $K \neq 1$ схема заміщення, приведена до будь-якої напруги, має аналогічний вигляд.

Для трифазних силових трансформаторів найбільш зручно приводити параметри схеми заміщення до сторони напруги споживача для зручності співставлення з параметрами елементів виходу (узагальненим навантаженням).

Параметри елементів схеми заміщення можуть бути обчислені на основі таких

положень.

1. При короткому замиканні на виході силового трансформатора струм короткого замикання практично проходить елементами $X_{\sigma 1}$, R_1 , R_2 , $X_{\sigma 2}$. Внаслідок того, що струм короткого замикання I_k на 2-3 порядки перевищує струм неробочого ходу $I_{нх}=I_{\mu}$ можна знехтувати впливом X_{μ} і R_{μ} і схема заміщення прийме вигляд:

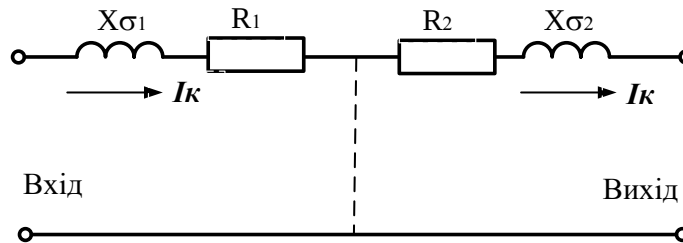


Рис.2. Спрощена схема заміщення однофазного (однієї фази трифазного) силового трансформатора

Для даної схеми повний опір короткого замикання

$$Z_k = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2})^2}, \quad \text{Ом/фазу.}$$

Для спрощення

$$R_k = R_1 + R_2, \quad X_k = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2},$$

Параметр Z_k визначається на основі результатів досліду короткого замикання

$$Z_k = \frac{U_{кф}}{I_{нф}} = \frac{U_{к\%} \cdot U_n}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_n} = \frac{U_{к\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}, \quad \text{Ом/ф.}$$

Для зручності розрахунків перетворюємо формулу

$$Z_k = \frac{10 \cdot U_{к\%} \cdot U_n^2}{S_n}, \quad \text{Ом/фазу,} \quad (1)$$

де U_k – напруга короткого замикання, %; U_n – номінальна напруга, кВ;
 S_n – номінальна потужність, кВ·А.

Втрати короткого замикання

$$\Delta P_{кз} = 3 \cdot I_n^2 \cdot (R_1 + R_2) = 3 \cdot I_n^2 \cdot R_k, \quad \text{Вт.}$$

Звідси

$$R_k = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_n^2}{S_n^2}, \quad \frac{\text{Ом}}{\text{фазу}}. \quad (2)$$

Тоді

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, \text{ Ом/фаза.} \quad (3)$$

2. У режимі неробочого ходу трансформатора опір виходу $Z_{\text{вих.}} = \infty$ і струм неробочого ходу $I_{\text{н.х.}}$ протікає колом $X_{\sigma 1}$, R_1 , X_μ , R_μ . Нехтуючи малими втратами в опорах $X_{\sigma 1}$ та R_1 , величини яких незначні в порівнянні з опорами X_μ та R_μ , матимемо

$$Z_\mu = \frac{U_{\text{н.ф.}}}{I_{\text{н.х.}}} = \frac{100 \cdot U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{н.х.}\%} \cdot I_{\text{н}}} = \frac{100 \cdot U_{\text{н}}^2}{I_{\text{н.х.}\%} \cdot S_{\text{н}}}, \text{ Ом/ф,}$$

При використанні одиниць вимірювання $U_{\text{н}}$ – кВ, а $S_{\text{н}}$ – кВ·А, отриманий вираз матиме вигляд

$$Z_\mu = \frac{U_{\text{н}}^2 \cdot 10^5}{I_{\text{н.х.}\%} \cdot S_{\text{н}}}, \text{ Ом/ф,} \quad (4)$$

Активна складова втрат неробочого ходу трансформатора може бути виражена

$$\Delta P_{\text{н.х.}} = 3 \cdot I_{\text{н.х.}}^2 \cdot R_\mu = 3 \cdot \left(\frac{I_{\text{н.х.}\%}}{100} \cdot I_{\text{н}} \right)^2 \cdot R_\mu$$

Звідки

$$R_\mu = \frac{\Delta P_{\text{н.х.}} \cdot 10^4}{3 \cdot I_{\text{н}}^2 \cdot I_{\text{н.х.}\%}^2},$$

Перетворимо отриманий вираз для більш зручного використання

$$R_\mu = \frac{\Delta P_{\text{н.х.}} \cdot 10^4 \cdot U_{\text{н}}^2}{3 \cdot I_{\text{н}}^2 \cdot U_{\text{н}}^2 \cdot I_{\text{н.х.}\%}^2} = \frac{\Delta P_{\text{н.х.}} \cdot U_{\text{н}}^2 \cdot 10^4}{S_{\text{н}}^2 \cdot I_{\text{н.х.}\%}^2}, \text{ Ом/ф,} \quad (5)$$

У виразі (5) $\Delta P_{\text{н.х.}}$ – втрати неробочого ходу трансформатора, Вт.

Тоді

$$X_\mu = \sqrt{Z_\mu^2 - R_\mu^2}, \text{ Ом/ф.} \quad (6)$$

За допомогою виразів (1)...(6) визначені параметри схеми заміщення силових трансформаторів споживчих підстанцій 10/0,4 кВ (табл.1).

При вмиканні на виході силового трансформатора конденсаторної батареї поперечної ємнісної компенсації в колах може виникати резонанс струмів і резонанс напруги.

1. Параметри силових трансформаторів 10/0,4 кВ і розрахункові дані конденсаторних батарей при яких виникають резонансні явища на основній частоті

№ п п	Параметри силових трансформаторів					Опори елементів схеми заміщення, Ом/фазу						Потужність КВ Q _c для виникнення резонансу на основній частоті, кВАр		Індуктивність L, мГн
	Тип трансформатора	Втрати к.з., ΔР _{к.з.} , кВт	Втрати н.х., ΔР _{н.х.} , кВт	Напруга к.з., U _{к.з.} , %	Струм н.х., I _{н.х.} , %	Z _к	R _к	X _к	Z _μ	R _μ	X _μ	струмів	напруги	
1	ТМ-25/10	0,125	0,6 0,69	4,5 4,7	3,2	0,288 0,301	0,154 0,177	0,243	200	62,5	190,0	0,84	658,4	0,774
2	ТМ-40/10	0,18	0,88 1,0	4,5 4,7	3,0	0,180 0,188	0,088 0,10	0,157 0,159	133	20,0	131,5	1,22	1019,1 1006,3	0,500 0,506
3	ТМ-63/10	0,265	1,28 1,47	4,5 4,7	2,8	0,114 0,119	0,051 0,059	0,102 0,103	90,7	13,6	90,0	1,78	1568,6 1553,4	0,325 0,328
4	ТМ-100/10	0,365	1,97 2,27	4,5 4,7	2,6	0,072 0,075	0,032 0,036	0,065 0,066	61,5	8,64	61,0	2,62	2461,5 2424,2	0,207 0,210
5	ТМ-160/10	0,54	2,65 3,1	4,5 4,7	2,4	0,045 0,047	0,016 0,019	0,042 0,043	41,7	5,86	41,3	3,87	3809,5 3720,9	0,134 0,137
6	ТМ-250/10	0,78	3,7 4,2	4,5 4,7	2,3	0,029 0,030	0,009 0,011	0,027 0,028	27,8	3,77	27,5	5,82	5925,9 5714,3	0,086 0,089
7	ТМ-400/10	1,08	5,5 5,9	4,5	2,1	0,018	0,0055 0,0059	0,0171 0,0170	19,05	2,45	18,9	8,47	9356,7 9411,8	0,054
8	ТМ-630/10	1,68	7,6 8,5	5,5	2,0	0,014	0,0031 0,0034	0,0136	12,7	1,69	12,6	12,7	11764,7	0,043

Резонанс струмів виникає тоді, коли опір конденсаторної батареї X_c та індуктивний опір контуру намагнічування X_μ рівні, тобто $X_c = X_\mu$. Резонанс струмів для кожного трансформатора буде виникати при певній ємності конденсаторів батареї.

Оскільки на виході силового трансформатора зазвичай вмикаються конденсаторні батареї для компенсації реактивної потужності, які представляються реактивною потужністю Q_c , визначаємо потужності конденсаторних батарей, які викликають в силових трансформаторах резонанс струмів.

При опорі конденсатора X_c по конденсатору буде проходити струм

$$I_c = \frac{U_{н.ф.}}{X_c}.$$

Реактивна потужність конденсатора на одну фазу

$$Q_{c1} = U_{н.ф.} \cdot I_c = \frac{U_{н.ф.}^2}{X_c}, \text{ В} \cdot \text{Ар.}$$

Враховуючи лінійну напругу, виражену в кВ, отримаємо

$$Q_{c1} = \frac{U^2}{3 \cdot X_c} \cdot 10^3, \text{ кВ} \cdot \text{Ар},$$

а для трифазної конденсаторної батареї

$$Q_c = \frac{U_n^2}{X_c} \cdot 10^3, \text{ кВ} \cdot \text{Ар}, \quad (7)$$

де Q_c – потужність конденсаторної батареї, кВА; U_n – номінальна напруга мережі, кВ; $X_c = X_\mu$ – опір конденсаторної батареї, Ом/ф.

Результати досліджень та їх обговорення.

У табл.1 наведені результати розрахунків потужності конденсаторних батарей, які викликають резонанс струмів на частоті 50 Гц.

Резонанс струмів є корисним явищем, оскільки зменшують струм неробочого ходу, споживаного з мережі, але в колі може виникати і резонанс напруг.

Нехтуючи великим опором X_μ , можна зробити висновок, що резонанс напруг виникає при рівності ємнісного опору конденсаторів батареї X_c та індуктивного опору короткого замикання X_k , тобто $X_c = X_k$.

Як і в попередньому випадку, параметром конденсаторної батареї є реактивна потужність, яка визначається за (7). Результати розрахунку потужності і ємності конденсаторної батареї, при якій виникає резонанс напруг на основній частоті 50 Гц, теж наведені в табл.1.

Враховуючи, що форма кривої напруги на виході трансформатора несинусоїдальна і містить вищі гармонічні складові, в практиці можуть виникнути явища резонансу напруг для вищих гармонік, кратних основній частоті.

Оскільки індуктивні опори зростають пропорційно частоті, а ємнісні зменшуються пропорційно частоті, то резонанс напруг для кратних гармонік може виникнути при потужностях конденсаторних батарей, менших в n^2 разів порівняно з

потужністю конденсаторних батарей на основній частоті 50 Гц, де n – кратність гармоніки по відношенню до основної. Так, для 3-ї гармоніки ($f=150$ Гц) $n^2=9$, для 5-ї гармоніки ($f=250$ Гц) $n^2=25$, для 7-ї гармоніки ($f=350$ Гц) $n^2=49$ і т.д.

Дані розрахунків потужності батарей конденсаторів, необхідних для виникнення резонансу напруг на вищих гармоніках, наведені в табл.2.

Резонанс напруг (послідовний резонанс) настає в тому випадку, коли комплексний опір двополюсника чисто активний, тобто $Z=R$.

Резонанс напруг можна отримати, змінюючи індуктивність L , ємність C контуру або частоту $\omega=2\pi f$. При резонансній частоті, рівній

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

індуктивний і ємнісний опір рівні.

Тоді

$$\omega_0 \cdot L = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho.$$

Величина $Q_d=\rho/R$ називається добротністю, яка характеризує резонансні властивості двополюсника. Чим більша Q_d , тим більша напруга на індуктивності U_L і ємності U_C , і струм при резонансі I_d , які визначаються за наступними виразами

$$U_L=U_C=Q_d \cdot U,$$

$$I_d = Q_d \cdot U/\rho.$$

Згідно [2] побудовані резонансні криві струмів і напруги

$$I = \frac{U}{R \cdot \sqrt{1+Q^2 \cdot (K-\frac{1}{K})^2}}, \quad U_C = \frac{U \cdot Q}{K \cdot \sqrt{1+Q^2 \cdot (K-\frac{1}{K})^2}}, \quad U_L = \frac{K \cdot U \cdot Q}{K \cdot \sqrt{1+Q^2 \cdot (K-\frac{1}{K})^2}},$$

де $K=\omega/\omega_0$;

Оскільки при вмиканні конденсаторних батарей на шинах нижчої напруги силових трансформаторів в колах можуть виникати резонансні явища, визначимо параметри схеми заміщення трансформатора і батарей конденсаторів, при яких можливі резонансні явища на частотах вищих гармонік.

2. Розрахункові дані конденсаторних батарей при яких виникають резонансні явища на частотах, кратних основній

№ п/п	Тип трансформатора	Індуктивність L, мГн	Потужність КБ Q _c для виникнення резонансу на частотах, кратних основній, кВАр				Ємність (мкф/фазу), при якій виникає резонанс напруги на частотах			
			150	250	350	550	50	150	250	350
1	ТМ-25/10	0,774	73,16	26,34	13,34	5,44	13105	1456,2	524,3	267,5
2	ТМ-40/10	0,500	113,23	40,76	20,8	8,42	20284	2253,7	811,3	414,0
		0,506	11,81	40,25	20,54	8,32	20029	2225,5	801,1	408,8
3	ТМ-63/10	0,325	174,3	62,74	32,01	12,96	31221	3469,1	1249	637,1
		0,328	172,6	62,14	31,7	12,84	30919	3435,4	1237	631,0
4	ТМ-100/10	0,207	273,5	98,46	50,23	20,34	48994	5444	1960	1000
		0,210	269,4	96,97	49,47	20,03	48251	5361	1930	985
5	ТМ-160/10	0,134	423,3	152,4	77,7	31,5	75824	8425	3033	1547
		0,137	413,4	148,8	75,9	30,75	74061	8229	2962,5	1511,5
6	ТМ-250/10	0,086	658,4	237,0	120,9	48,97	1117925	13105	4718,0	2407
		0,089	634,9	228,6	116,6	47,23	113714	12637	4549,5	2321
7	ТМ-400/10	0,054	1039,6	374,3	190,9	77,3	186198	20692	7450	3800
			1045,7	376,5	192,1	77,8	187295	20814	7495	3824
8	ТМ-630/10	0,043	1307,2	470,6	240,1	97,2	234117	26018	9367	4779

І так, для послідовного кола

$$L_k = \frac{X_k}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{X_k}{314}, \text{ Гн.} \quad (8)$$

$$X_c = \frac{U_n^2}{Q_c} \cdot 10^3,$$

З іншої сторони

$$X_c = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C},$$

Тоді ємність батарей конденсаторів

$$C = \frac{Q_c \cdot 10^6}{314 \cdot U_n^2}, \frac{\text{мкф}}{\text{фазу}}.$$

де Q_c – потужність батареї конденсаторів, кВАр; U_n – номінальна напруга, кВ.

На основі величин L і C (для різних потужностей трансформаторів і резонансу на різних частотах) визначені величини добротності (табл.3).

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Висновки і перспективи. Аналізуючи результати табл.1, можна відмітити, що для виникнення резонансу струмів на частоті 50 Гц для трансформаторів різних потужностей необхідне встановлення батарей конденсаторів від 0,02 кВ·Ар на 1 кВ·А потужності (для трансформатора 630 кВ·А) до 0,034 кВ·Ар (для трансформатора 25 кВ·А), а для виникнення резонансу напруги відповідно від 18,7 кВ·Ар/кВ·А до 26 кВ·Ар/кВ·А.

Нескладні розрахунки показують, що для підвищення коефіцієнта потужності навіть на малу величину (від 0,9 до 0,95) необхідне встановлення батарей конденсаторів не менше 0,14 кВ·Ар/кВ·А, а для збільшення коефіцієнта потужності від 0,7 до 0,95 – всього 0,66 кВ·Ар/кВ·А.

3. Добротність контуру з індуктивністю трансформаторів і ємністю конденсаторних батарей при різних частотах

№ пп	Тип трансформа тора	Величина $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ для різних частот					Добротність контуру $Q=\rho/R_k$				
		50	150	250	350	550	50	150	250	350	550
1	ТМ-25/10	0,243	0,729	1,215	1,701	2,673	1,58 1,55	4,73 4,64	7,89 7,74	11,05 10,83	17,36 17,03
2	ТМ-40/10	0,157 0,159	0,471 0,477	0,785 0,795	1,099 1,1125	1,727 1,748	1,784 1,59	5,35 4,77	8,92 7,95	12,5 11,13	19,6 17,5
3	ТМ-63/10	0,102 0,103	0,306 0,309	0,510 0,515	0,714 0,721	1,12 1,13	2,00 1,75	6,00 5,24	10,0 8,73	14,0 12,2	22,0 19,2
4	ТМ-100/10	0,065 0,066	0,195 0,198	0,325 0,330	0,455 0,462	0,715 0,725	2,06 1,83	6,19 5,50	10,32 9,17	14,4 12,8	22,7 20,1
5	ТМ-160/10	0,042 0,043	0,126 0,129	0,210 0,215	0,294 0,301	0,462 0,473	2,63 2,26	7,88 6,79	13,1 11,3	18,4 15,8	28,9 24,9
6	ТМ-250/10	0,027 0,028	0,081 0,084	0,135 0,140	0,189 0,196	0,297 0,308	3,00 2,55	9,00 7,64	15,0 12,7	21,0 17,8	33,0 28,0
7	ТМ-400/10	0,017	0,051	0,085	0,119	0,187	3,09 2,88	9,27 8,64	15,45 14,41	21,6 20,2	34,0 31,7
8	ТМ-630/10	0,0135	0,0406	0,0677	0,0948	0,149	4,35 3,97	13,1 11,9	21,8 19,9	30,6 27,9	48,1 43,85

Таким чином, при встановленні конденсаторних батарей поперечної

компенсації на частоті 50 Гц резонанс струмів і резонанс напруг практично неможливий, оскільки для виникнення резонансу струмів потужність конденсаторів складає соті долі від номінальної потужності трансформатора, а для виникнення резонансу напруг – перевищує потужність трансформатора в десятки разів.

Список літератури

1. Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії, затвердженої Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 06.02.2018р №87. К.: Об'єднання галузевих підприємств «ГРІФРЕ», 2018. 20 с.
2. Бойко В. С., Бойко В.В., Водолуб Ю.Ф. і ін.; за заг. ред. І. М. Чиженка, В.С. Бойка. Теоретичні основи електротехніки: підруч. у 3-х т. К.: Політехніка. 2004. Т.1. 272 с.
3. Омельчук А. О. Енергозберігаючі режими в системах електропостачання. К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2016. 257 с.
4. СОУ – Н МПЕ 40.1.20.510.:2006. Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживача. Мінпаливенерго, наказ № 1 від 05.01.2006.
5. Правила улаштування електроустановок. Х.: Форт, 2017. 760 с.

References

1. Metodyky obchyslennia platy za peretikannia reaktyvnoi elektroenerhii, zatverdzhenoї Nakazom Minenerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy vid 06.02.2018r №87 [Methods of calculating the fee for the flow of reactive electricity]. Kyiv: Ob'iednannia haluzevykh pidpryiemstv «HRIFRE», 2018. 20.
2. Boiko, V. S., Boiko, V. V., Vodoliub, Yu. F. (2004). Teoretychni osnovy elektrotekhniky [Theoretical foundations of electrical engineering]. Kyiv: Politekhnik, Vol. 1, 272.
3. Omelchuk, A. O. (2016). Enerhozberihaiuchi rezhymy v systemakh elektropostachannia [Energy-saving modes in power supply systems]. Kyiv: TsP «KOMPRYNT», 257.
4. SOU – N MPE 40.1.20.510.:2006. Metodyka vyznachennia ekonomichno dotsilnykh obsiahiv kompensatsii reaktyvnoi enerhii, yaka peretikaie mizh elektrychnymy merezhamy elektroperevalnoi orhanizatsii ta spozhyvacha [Methodology for determining economically feasible amounts of compensation for reactive energy that flows between the electric networks of the power transmission organization and the consumer]. Minpalyvenerho, nakaz № 1 vid 05.01.2006.
5. Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok [Rules for arranging electrical installations] (2017). Kharkiv: Fort., 760.

STUDY OF RESONANCE PHENOMENA WHEN CONNECTING 0.38 KV BATTERIES OF TRANSVERSE COMPENSATION CAPACITORS TO THE NETWORK

A.Omelchuk, D. Derevyanko, V.Tkachenko

Abstract. *The article deals with the operation of capacitor banks as part of regulated capacitor units connected to the 0.38 kV electrical network of power transformers of 10/0.4 kV consumer substations. It is known that capacitor banks are used to compensate for the reactive power of electrical receivers and equalize the load of phases in three-phase four-wire networks of 0.30 kV by creating reverse sequence currents equal in magnitude, but rotated by 180° relative to the load currents due to the inclusion of a different number of capacitors between the network phases.*

The wide presence of non-linear electrical receivers in electric networks causes the occurrence of higher harmonic components of voltage and current, which cause an increase in the current in capacitors, since the reactive resistance of capacitors decreases with increasing frequency. At the same time as the current in the capacitors increases, which can be regulated with the help of constructive measures, in unfavorable cases resonance phenomena may occur in the networks. Widespread use of capacitor banks creates risks of resonance of voltages and currents both at the main frequency of three-phase alternating current of 50 Hz and at frequencies of 150, 250, 350 and 550 Hz due to higher harmonic components of voltage and current.

The obtained results indicate that for the resonance of currents to occur at the main frequency for power transformers of different capacities, the power of the capacitor banks should be from 0.02 kV·Ar per 1 kV·A of power (for a 630 kV·A transformer) to 0.034 kV·Ar (for a 25 kV·A transformer), and for the occurrence of voltage resonance, respectively, from 18.7 kV·Ar/kV·A to 26 kV·Ar/kV·A.

In addition, calculations show that to increase the power factor even by a small amount (from 0.9 to 0.95), it is necessary to install capacitor banks of at least 0.14 kV·Ar/kV·A, and to increase the power factor from 0.7 to 0.95 - only 0.66 kV·Ar/kV·A.

Key words: *capacitor batteries, power transformers, capacity, inductance, resonance of voltages and currents, Q-factor of the circuit*