

## ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ДВОФАЗНИХ ВИМИКАЧІВ НА ТРИФАЗНИХ ПРИЄДНАННЯХ РП-27,5 кВ

На основі матеріалів науковців МГУПС, ПГУПС та ТОВ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» автором даної статті з доповненнями розглянута практична можливість використання двополюсних вимикачів на трифазних приєднаннях РП-27,5 кВ.

На основании материалов ученых МГУПС, ПГУПС и ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» автором данной статьи с дополнениями рассмотрена практическая возможность использования двухполюсных выключателей на трехфазных присоединениях РУ-27,5 кВ.

On the basis of materials of scientists of Moscow and Petersburg State Universities of C Ways and «NIEFA-ENERGO Ltd.» the author of this article with additions has considered a practical possibility of us bipolar switches on three-phase connections of distributive device 27,5 kV.

Досвід електрифікованих залізниць в Україні й за кордоном дозволяє відзначити тенденції в подальших розробках устаткування і розподільних пристроїв 27,5 кВ: закриті компактні розподільні пристрої; блоково-модульна технологія; надійні малообслуговувані вакуумні вимикачі; мікропроцесорне керування.

При новому будівництві і модернізації тягових підстанцій змінного струму (для існуючої системи живлення) пропонується:

- на вводі, у фазі «с», вимикач не встановлювати;

- на всіх трифазних приєднаннях РП-27,5 кВ використовувати два однофазних вимикачі, оснащених загальним приводом (якщо застосувати індивідуальні привода, то необхідне введення захисту від неповнофазних режимів) замість одного трифазного вимикача.

Реалізація пропозиції дозволяє уніфікувати вузли камер РП-27,5 кВ; зробити роботу РП-27,5 кВ надійнішою; зменшити вартість виготовлення РП-27,5 кВ і скоротити експлуатаційні витрати на обслуговування РП-27,5 кВ.

Пропонована схема живлення тягової мережі 27,5 кВ неістотним для даного розгляду спрощенням показана на рис. 1.

Покажемо спочатку, що реалізація пропозиції не змінить потенційних умов роботи знижувального трансформатора. Для цього звернемо увагу на те, що за прийнятої на дорогах України і країн СНД схеми живлення тягової мережі, так само як і в пропонованій схемі фаза «с» виконується у вигляді так званої «земляної шини», зазвичай у вигляді відрізка рейки, прокладеної в землі та сполученої з рейковим фідером (РФ), рейкою під'їзного шляху (РП) і контуром заземлення тягової підстанції (КЗП), тобто в

робочому режимі, коли знижувальний трансформатор включений, фаза «с» заземлена, її потенціал щодо землі рівний нулю, а потенціал двох інших фаз вище на величину відповідної лінійної напруги.

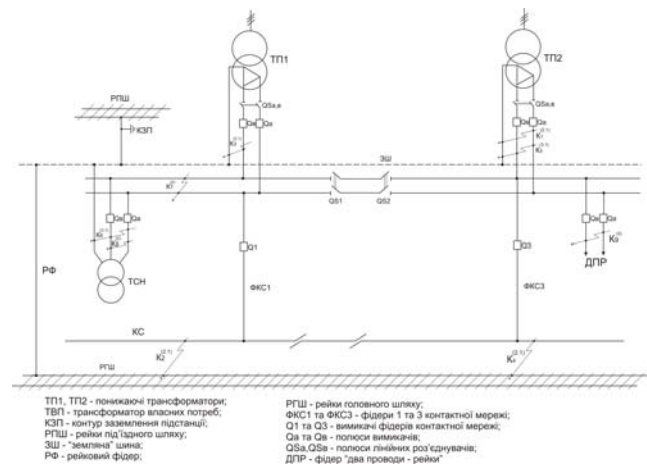


Рис. 1. Схема живлення контактної мережі від розподільного пристрою 27,5 кВ з двополюсними вимикачами

Остання обставина дуже важлива, оскільки з неї виходить однозначний висновок про те, що на такий потенційний режим знижувальні трансформатори розраховані спочатку. Ясно і інше: відключення двох фаз «а» і «b» нічого в потенційному режимі не . Фаза «с» залишається на потенціалі землі, а потенціали двох інших фаз вище на величину відповідної лінійної напруги, тобто трансформатор залишається при цьому в умовах потенційного режиму, на який він розрахований.

Покажемо тепер, що реалізація цієї пропозиції не змінить умов безпеки обслуговування устаткування тягової підстанції.

На рис. 1 показана спрощена схема, в дійсності ж після тягового трансформатора залишається трифазний роз'єднувач, який необхідний, по-перше, для безпечного обслуговування РП-27,5 кВ (наприклад, в режимі, коли повністю відключається РП-27,5 кВ, а РП-35 кВ продовжує електропостачання), по-друге, для перешкоди проникнення струмів зворотної з інших підстанцій при вимушеному режимі. Крім того, в розподільчому пристрої з камерами викатного типу обслуговування основних силових елементів (вимикачів і трансформаторів струму) повинне проводитися поза камерою, при від небезпечних місць. Для обслуговування або ремонту ділянок силового кола їх відключення проводиться викочуванням відповідних вимикачів розривом кола по обох сторонах. Таким чином, пропонується схема не викликає погіршення умов безпечного обслуговування устаткування.

Всі двофазні к.з. між фазами «*a* - *c*» (в точках  $K_1$  і  $K_2$ ), «*b* - *c*» (в точках  $K_3$  і  $K_4$ ), а також трифазне к.з. між фазами «*a* - *b* - *c*» (в точках  $K_5$  і  $K_6$ ) є одночасно к.з. на землю. Єдиними к.з. без контура через землю будуть к.з. між фазами «*a* - *b*» (в точках  $K_7$ ,  $K_8$  і  $K_9$ ).

За ГОСТ 687-78 «Выключатели переменного тока на напряжение выше 1000 В. Общие технические условия» відключаюча здатність вимикача характеризується наступними параметрами:

- номінальним струмом відключення у вигляді діючого значення періодичної складової струму, що відключається;
- нормованими параметрами перехідної відновлюваної напруги (ПВН).

При рівних струмах, що відключаються, відмінність полягає тільки в амплітуді напруги, що відновлюється. Вище значення напруги, що відновлюється, визначає більш складний режим відключення даного виду к.з. При неекстремальних умовах штучне зменшення максимального значення амплітуди напруги, що відновлюється, на  $N$  % дозволяє збільшити величину струму, що відключається, також приблизно на  $N$  %.

Однофазні вимикачі на напругу 27,5 кВ виготовляються, як правило, на базі одного полюса трифазного вимикача на 35 кВ. У всіх випадках номінальний струм відключення початкового трифазного і виконаного на його базі однофазного вимикача зберігається незмінним. Це означає, що порівняння умов відключення струмів короткого замикання цими вимикачами при всіх видах короткого замикання

досить виконати тільки за величиною напруги, що відновлюється, на контактах вимикача.

Практично при визначенні труднощі відключення вимикачем того або іншого струму оперують напругою, що повертається, величина якої пропорційна амплітуді напруги, що відновлюється. Напругою, що повертається, називають напругу, яку мережа сформувала б на контактах полюса вимикача у момент досягнення струмом, що відключався, нуля, за умови, що відсутня ємність фаз на землю, завдяки якій в мережі, що відключається, насправді формується відновлювальна напруга, що має коливальний характер. Простіше і зручніше використовувати напругу, що повертається, оскільки її величину легко визначити з векторних діаграм.

Тому, враховуючи все сказане вище, оцінюватимемо труднощі відключення вимикачем того або іншого  $n$ -го виду короткого замикання величиною напруги  $U_0^{(n)}$ , що повертається, вважаючи, що більше значення його визначає велику труднощі відключення к.з.

При порівнянні ефективності відключення можна вважати, що вимикачі  $Q_a$  і  $Q_b$  на введенні і в колі ТВП згідно пропозиції еквівалентні вимикачам  $Q_1$  і  $Q_3$  на фідерах контактної мережі, причому останні надійно відключають максимальні струми коротких двофазних замикань на землю в точках  $K_2$  і  $K_4$  за умови одночасної роботи відразу двох знижувальних трансформаторів ПТ1 і ПТ2 і включених секційних роз'єднувачах QS1 і QS2 (за такої схеми будуть найбільші струми к.з, які створюють найбільше значення ПВН).

Визначимо ефективність відключення трифазного к.з. початковим трифазним вимикачем на 35 кВ – базовим для створення однофазного вимикача для фідерів контактної мережі 27,5 кВ. При цьому врахуємо, що мережа напругою 35 кВ за «ПУЭ» виконується з ізольованою нейтраллю. Як відомо, в цьому випадку найбільшу труднощі при відключенні зазнає полюс трифазного вимикача, що відключає першу фазу при трифазному (без землі) короткому замиканні в чисто індуктивному колі. На рис. 2 показана схема мережі 35 кВ трифазним вимикачем в положеннях відповідно на холостому ходу (рис. 2а), у момент короткого замикання (рис. 2б, в) і відразу ж після відключення першим полюсом вимикача фази «*a*» при трифазному к.з. (рис. 2г).

Через симетрію всіх фаз мережі щодо землі, як на холостому ходу (рис. 2а), так і в момент трифазного к.з. (рис. 2б), а також через симетрію тих фаз, що залишилися (двох короткозам-

кнених фаз мережі «b» і «c» щодо землі після відключення фази «a»), має місце розрахунок за допомогою векторних діаграм режиму в трифазній мережі, такий як обрив фазного дроту. Тому в момент досягнення струмом фази «a» нуля (момент  $t = 0$ ) напруга, що повертається, на полюсі вимикача  $U_0^{(3)}$ , що відключився, рівна різниці потенціалу джерела і точки  $K^{(3)}$ . Як видно з діаграми (рис. 2д), ця різниця, тобто напруга, що повертається, на першому полюсі вимикача рівна:

$$U_0^{(3)} = 1,5 \cdot U \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 1,5 \cdot 37 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 45,2 \text{ кВ}, \quad (1)$$

де  $U$  – лінійна напруга мережі.

Оскільки однофазний вимикач утворений на базі трифазного, напруга, що повертається, при відключенні ним всіх видів к.з. на приєднаннях РП-27,5 кВ не повинна бути вище, ніж у початкового вимикача при відключенні ним струму трифазного замикання, а саме 45,2 кВ. Покажемо, що це насправді так. Спочатку розглянемо умови роботи двох однофазних вимикачів ВБЦО на трифазних приєднаннях РП-27,5 кВ.

Оскільки фаза «c» наглухо заземлена, то всі трифазні к.з. є одночасно к.з. на землю (на векторній діаграмі на це вказуватиме верхній індекс (3.1) при напрузі, струмах). Врахуємо також, що розрахунковим є трифазне к.з. на введенні ТВП в точці  $K_6$ , як таке, що супроводжується найбільшим струмом к.з. за умови, що включені Т1, Т2 і секційні роз'єднувачі QS1 та QS2.

Послідовність відключення двома однофазними вимикачами трифазного короткого замикання в мережі 27,5 кВ, наприклад к.з. у точці  $K_6$  на введенні ТВП, супроводжується процесами неодночасного спрацювання полюсів. Спочатку вимикачем Qa або Qb відключається перша фаза (відповідно «a» або «b») трифазного короткого замикання. Після чого струм к.з. у колі зменшується в  $\frac{2}{\sqrt{3}}$  разів, і коротке замикання продовжується як двофазне к.з. При створенні відповідних умов і зниженні струму в колі к.з. до нуля це двофазне к.з. відключає другий полюс вимикача, що залишався невідключеним.

Відмітимо, що умови відключення двофазного к.з. еквівалентні відключенню короткого замикання на фідері контактної мережі (в точках  $K_2$  або  $K_4$ ). Потенційні стани вузлів схеми заміщення до початку трифазного к.з., у момент к.з. і після відключення першого вимикача пока-

зані на рис. 3а, б і в. Векторна діаграма струмів і напруг при к.з. наведена на рис. 3г.

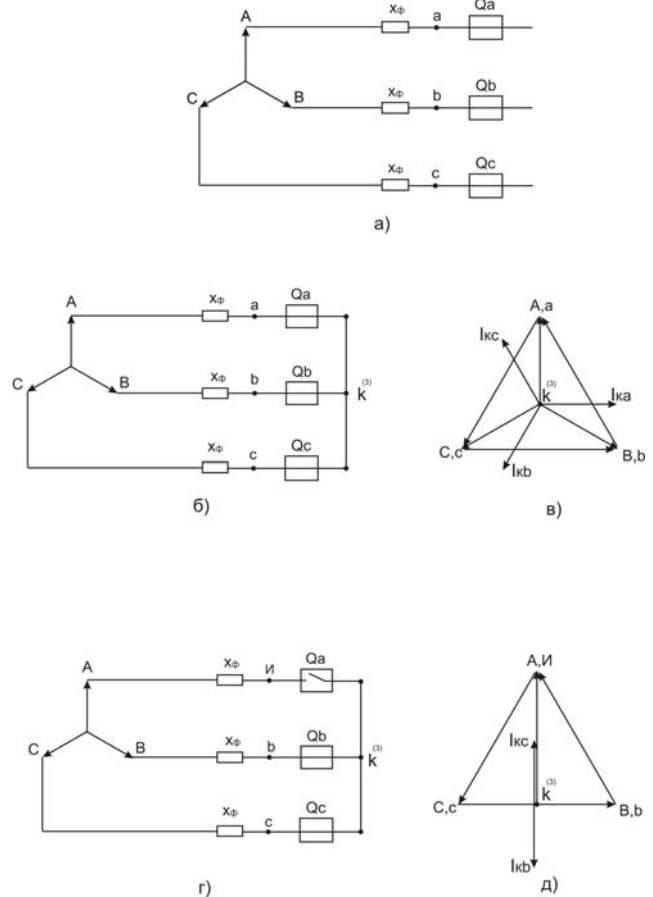


Рис. 2. Схема заміщення та векторні діаграми мережі 35 кВ з трифазними вимикачами

Напруга, що повертається, визначається як різниця потенціалів джерела (точка И) приймача (точка  $K^{2,1}$ ). Значення повертаючої напруги складе:

$$U_0^{(3,1)} = U_{AB} = U_{CA} = 27,5 \cdot \sqrt{2} = 38,89. \quad (2)$$

Якщо як трифазний вимикач в РП-27,5 кВ використовується симетричний вимикач, тобто вимикач, в якому кожен полюс здатний першим почати відключення трифазного к.з., те відключення трифазного к.з. двополюсним вимикачем приводить лише до того, що першими можуть почати відключення тільки вимикачі фаз «a» і «b». Тому, якщо в даній ситуації першим створюються умови для початку відключення трифазного к.з. у фазі «c», де вимикача немає, відключення к.з. почнеться полюсом фази «a» через 6,7 мс або полюсом фази «b» через 13,4 мс. Така затримка за часом початку відключення к.з. мала порівняно із затримкою відключення, створюваною витримкою за часом захисту ТВП або вводу, і тому її можна не враховувати. Тим

більше що, вірогідність її визначатиметься лише третьою частиною всіх відключень.

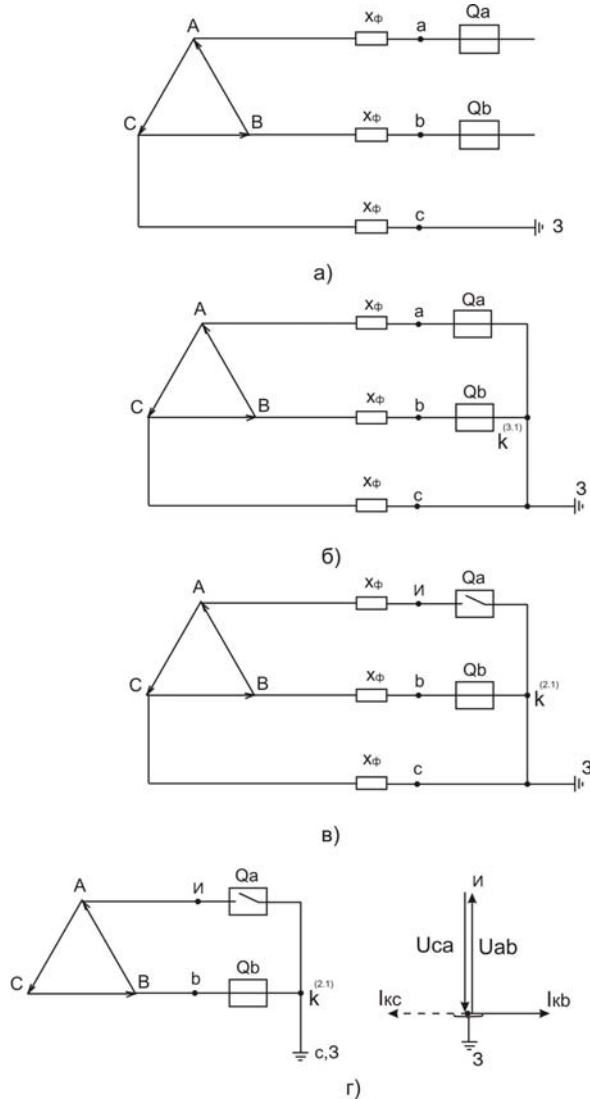


Рис. 3. Схема заміщення та векторні діаграми мережі з однофазними вимикачами

Покажемо тепер, що за прийнятої схеми живлення РП-27,5 кВ напруга, що повертається, така ж сама та супроводжує відключення міжфазних коротких замикань на фідерах контактної мережі в точках  $K_2$  і  $K_4$  (а отже і двофазного короткого замикання на завершуючій стадії відключення трифазного короткого замикання) за умови, що включено два трансформатори і секційні роз'єднувачі QS1 і QS2. Стани мережі до моменту замикання, у момент замикання в точці  $K_4$  і після відключення замикання вимикачем Q3 показані відповідно на рисунку 4а, б і в. З векторної діаграми (рисунок 4г) струмів і напруги схеми видно, що напруга, яка повертається,  $U_0^{(2,1)}$  дорівнює різниці потенціалів джерела живлення (у точці II) і точки короткого замикання в мережі (у точці

$K^{(2,1)}$ ). Ця різниця дорівнює амплітуді лінійної напруги мережі:

$$U_0^{(2,1)} = U_{ac} \cdot \sqrt{2} = 27.5 \cdot \sqrt{2} = 38.89 \text{ кВ.} \quad (3)$$

Дане значення напруги, що повертається, менше, ніж при відключенні першої фази при трифазному замиканні в мережі 35 кВ трифазним вимикачем (42,5 кВ). Воно залишається таким же, як при відключенні одним з двох однофазних вимикачів першої фази при трифазному замиканні в мережі 27,5 кВ.

Найлегшими ж є відключення при двофазних к.з. без землі між фазами «а» і «b» на збірних шинах РП-27,5 кВ (у точці  $K_7$ ), на введенні ТВП (у точці  $K_8$ ) або ж на лінії ДПР (у точці  $K_9$ ) при одночасному спрацьовуванні вимикачів.

Схеми станів мережі до моменту замикання, у момент замикання в точці  $K_9$  і після відключення замикання вимикачами Qa і Qb, показані відповідно на рис. 5а, б, в. З векторної діаграми струмів і напруги на рис. 5г видно, що при одночасному відключенні вимикачів Qa і Qb напруга  $U_0^{(2)}$ , що повертається, рівна половині різниці потенціалів, джерела живлення (між точками II1 і II2), тобто половині амплітуди лінійної напруги (оскільки опори, що утворюються при розмиканні контактів вимикачів, з'єднані послідовно і на кожен з них припадає половина лінійної напруги)

$$U_0^{(2)} = \frac{U_{AB} \cdot \sqrt{2}}{2} = \frac{27.5 \cdot \sqrt{2}}{2} = 19.44 \text{ кВ.} \quad (4)$$

При ознайомленні з вищевикладеним може виникнути питання: а в чому принципова різниця між процесами в існуючій схемі живлення і в розглянутій вище? Різниця не існує, якщо першим починає відключення полюс фази «а» або «b», всі векторні діаграми та значення ПВН залишаються такі ж самі, як на рис. 3, 4, 5.

Але якщо першим почне відключення к.з. полюс фази «с», то схеми та векторні діаграми будуть мати вид, який представлений на рис. 6а, б, в, г.

Напруга, що повертається, в цьому випадку буде дорівнювати:

$$U_0^{(3)} = 1.5 \cdot U \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 1.5 \cdot 27.5 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 33.7 \text{ кВ.} \quad (5)$$

Видно, що ця напруга менша ніж 38,89 кВ (у випадку, коли в фазі «с» немає вимикача), але ж полюс вимикача без труднощів витримує напругу 42,5 кВ. Тобто, дещо завищуючи ПВН,

отримуємо такі переваги, як зниження вартості виготовлення РП, уніфікація обладнання камер (для ТВП, ДПР, вводу використовувати одностипні камери), зменшення затрат на обслуговування, збільшується надійність.

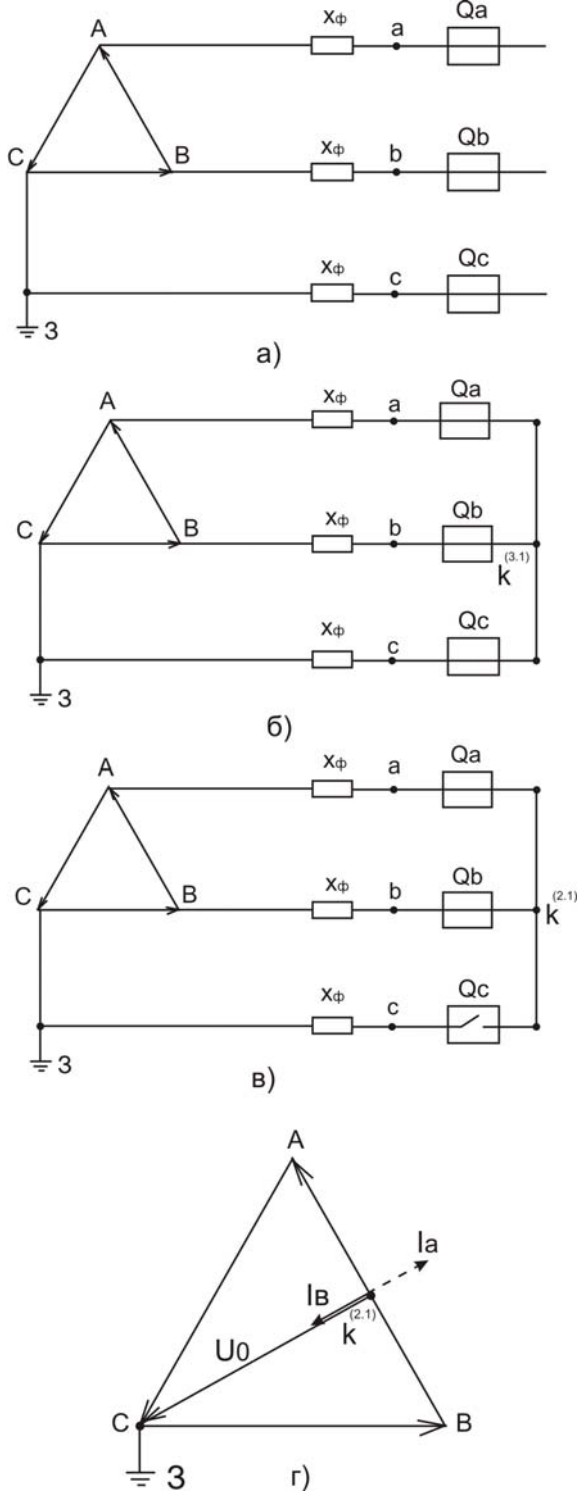


Рис. 4. Стан мережі до моменту замикання, у момент замикання в точці  $K_4$  і після відключення її вимикачем  $Q_3$

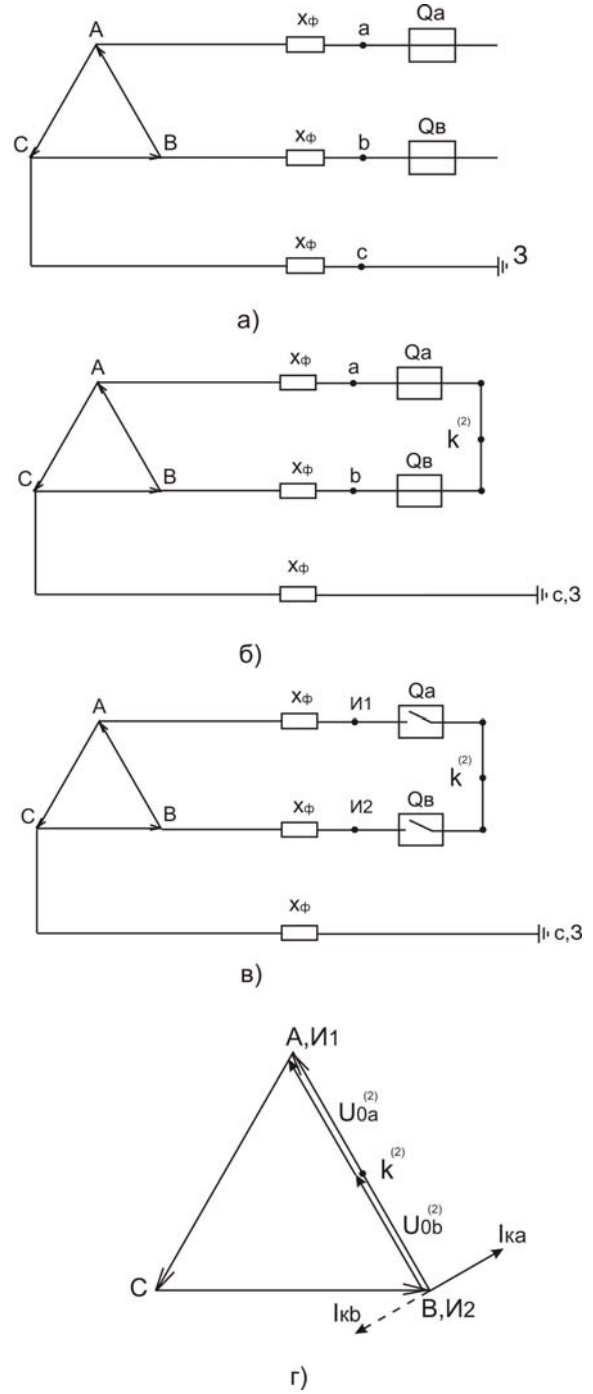


Рис. 5. Схема станів мережі до моменту замикання, в момент замикання точки  $K_9$  і після відключення вимикачами  $Q_a$  і  $Q_b$

На останній перевазі зупинимось детальніше.

На рис. 7а наведена умовна схема камери вводу РП-27,5 кВ з трьома вимикачами і роз'єдниками, а на рис. 7б показана схема тієї ж камери, але в двофазному виконанні викатного типу.

Позначимо вірогідність відмов елементів через  $Q$  відповідними індексами. Кожен елемент системи може відмовити незалежно від іншого. Отже, події відмов елементів – події

незалежні. Але ці події у свою чергу є і сумісними, оскільки відмова відразу декількох елементів може мати місце. Система відмовить, якщо відмовить один з елементів або різні їх поєднання.

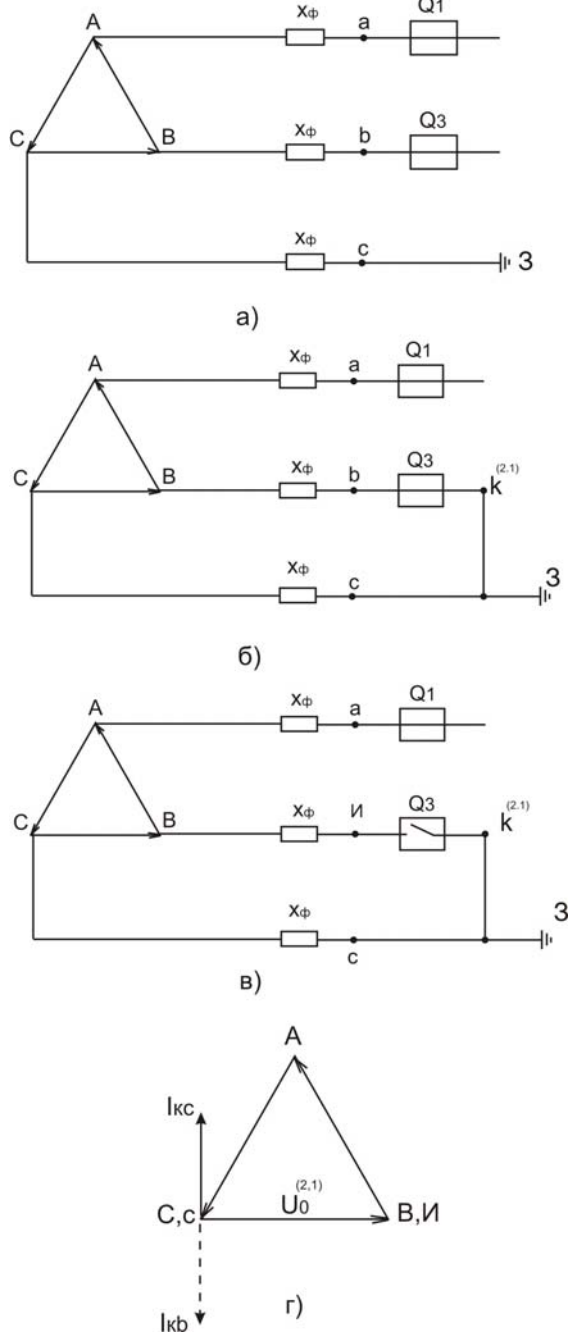


Рис. 6. Схеми станів та векторні діаграми при відключенні полюса «с»

Використовуючи формулу вірогідності суми сумісних подій отримаємо:

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q(A_i) - \sum_{i,j} Q(A_i \cdot A_j) + \sum_{i,j,k} Q(A_i \cdot A_j \cdot A_k) - \dots + (-1)^{n-1} \cdot Q(A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n), \quad (6)$$

де  $Q(A_i)$  – вірогідність відмови елемента  $A$ .

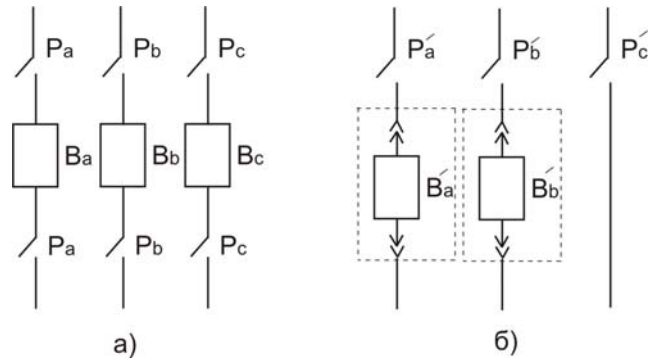


Рис. 7. Схема камери вводу розподільного пристрою 27,5 кВ

Розрахунок проведемо за умови, що в обох схемах вимикачі однотипні (з огляду на те, що розрахунки, що показують переваги вакуумних вимикачів в порівнянні з масляними, не є вже новизною і приведені у великій кількості). Метою даних обчислень є показати, як зміниться вірогідність безвідмовної роботи пофазної системи «вимикач – роз'єднувач» при використанні двофазного виконання останньої (системи).

Дані для розрахунків узяті з [1, 2] і зведені до табл. 1.

Таблиця 1

**Вірогідність безвідмовної роботи вимикача та роз'єднувача**

Елемент	$P$	$B_i$	$B'$ (вікатний тип)
$P(t)$	0,994	0,982	0,980

Вірогідність відмов отримаємо, використовуючи формулу:

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (7)$$

Оскільки вірогідність відмов є величиною порівняно малою, то для простоти розрахунку нехтуватимемо добутком членів у формулі (6), починаючи з третьої складової. Індексом «3Ф» позначимо вірогідність трифазної системи, а індексом «2Ф» – вірогідність однофазної системи. Отримаємо:

$$Q_{\Sigma 3\Phi} = 6 \cdot 0,006 + 3 \cdot 0,018 - 15 \cdot 0,006 \cdot 0,006 - 18 \cdot 0,006 \cdot 0,018 - 3 \cdot 0,018 \cdot 0,018 = 0,078;$$

$$Q_{\Sigma 2\Phi} = 3 \cdot 0,006 + 2 \cdot 0,02 - 3 \cdot 0,006^2 - 6 \cdot 0,006 \cdot 0,02 - 0,02^2 = 0,057.$$

Обчислимо вірогідність безвідмовної роботи трьох- і двофазних систем на підставі формули (7):

$$P(t)_{3\Phi} = 1 - 0,078 = 0,922;$$

$$P(t)_{3\Phi} = 1 - 0,057 = 0,943 .$$

У відношенні відмінність складе:

$$\Delta P = \frac{0,943 - 0,922}{0,943} \cdot 100 = 2,23 \%$$

Таким чином, при установці двофазних ви-  
микачів в камерах викатного типу на трифазні  
приєднання РП-27,5 кВ має місце підвищення  
надійності елементів камери на 2,23 %.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Варенцов, В. М. К вопросу о расчете надежности систем тягового электроснабжения [Текст] / В. М. Варенцов // Вестник ВНИИЖТа. – 2002. – № 4.
2. Пинчуков, П. С. Расчет надежности элементов электроэнергетических систем [Текст] : метод. указания по решению задач / П. С. Пинчуков. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2006. – 24 с.

Надійшла до редколегії 07.12.2008.