

УДК 621.311

В.Г.ЯГУП, д-р техн. наук

Харківська національна академія міського господарства

К.В.ЯГУП, канд. техн. наук

Українська державна академія залізничного транспорту, м.Харків

АНАЛІЗ ТРИФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Досліджується трифазне коротке замикання в нерозгалуженій мережі. Розглядається питання пошуку моменту комутації, при якому ударний струм при короткому замиканні буде максимальним. Оптимізація здійснюється в електронних таблицях MS Excel за допомогою надбудови «Пошук розв'язання».

Исследуется трехфазное короткое замыкание в неразветвленной цепи. Рассматривается вопрос поиска момента коммутации, при котором ударный ток при коротком замыкании будет максимальным. Оптимизация осуществляется в электронных таблицах MS Excel с помощью надстройки «Поиск решения».

A three-phase short circuit is probed in the unramified chain. The question of search of moment of commutation, at which a shock current at a short circuit will be maximal, is examined. Optimization is carried out in the spreadsheets of MS Excel by function «Search of decision».

Ключові слова: ударний струм, момент короткого замикання, оптимізація.

Аналіз режимів коротких замикань – це одне з найбільш поширених завдань при дослідженні і проектуванні електроенергетичних систем [1]. Трифазне коротке замикання (ТФКЗ) в нерозгалуженому колі є базовим для вибору комутаційної і захисної апаратури, а також для оцінки параметрів інших видів коротких замикань. При розрахунках ТФКЗ зазвичай розглядають симетричну систему з індуктивно-активним навантаженням і активно-індуктивному характері опору лінії передачі [2]. Такі допущення дозволяють розглядати ТФКЗ на прикладі однофазної еквівалентної схеми. Навіть при таких допущеннях аналітичне рішення приводить до досить громіздких виразів, які доводиться табулювати за допомогою комп'ютера. В решті решт, для оцінки ударного струму пропонуються наближені математичні вирази, що передбачають знаходження максимального значення ударного струму для найбільш важкого режиму ТФКЗ.

Метою статті є розробка методів чисельних розрахунків режиму ТФКЗ із реалізацією алгоритмів розрахунків у середовищі електронних таблиць MS Excel.

На рис.1 наведено еквівалентну розрахункову схему для аналізу ТФКЗ в разі повної симетрії, що представлена в однофазному варіанті.

При нормальному режимі ключ K розімкнений, і джерело живить

мережу і навантаження, що представляють послідовно сполучену індуктивність з резистором, які визначаються виразами:

$$L = L_K + L_H; \quad R = r_K + R_H .$$

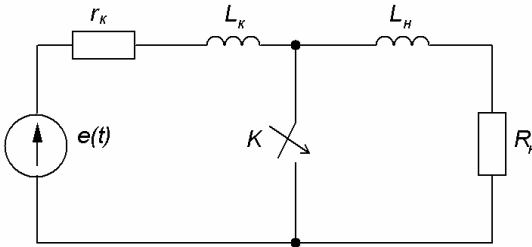


Рис.1

При короткому замиканні ключ K замикається, процеси в навантаженні визначаються затухаючою експонентою з постійною часу

$$\tau_H = \frac{L_H}{R_H} .$$

Величини індуктивності та опору визначаються виразами:

$$L = L_K; \quad R = r_K .$$

Процес у лівій частині схеми, що містить джерело синусоїдальної напруги, можна представити вільною й змушеною складовими струмів. Змушена складова може бути визначена як сталий процес при роботі джерела на навантаження з опором

$$z_K = r_K + j\omega L_K ,$$

де ω – частота живильної мережі.

Вільна складова визначається загасаючою експонентою з постійної часу $\tau_K = \frac{L_K}{R_K}$.

При аналізі режиму ТФКЗ у такий спосіб слід вирішити наступні завдання:

- 1) забезпечення розрахунків попереднього режиму живлення навантаження;
- 2) зміна параметрів кола в заданий момент часу;
- 3) визначення величини ударного струму з урахуванням заданого моменту ТФКЗ;
- 4) визначення моменту часу виникнення режиму ТФКЗ, відповідного до максимальної величини ударного струму.

Диференціальні рівняння передаварійного режиму записуються у вигляді:

$$L \frac{di}{dt} + ri = E_m \sin \omega t,$$

де E_m і ω – відповідно амплітуда і частота напруги живильної мережі.

При чисельному інтегруванні необхідно задати початкове значення струму $I(0)$, яке можна безпосередньо обчислити методом комплексних амплітуд. Комплексний опір кола нормального режиму:

$$z = (r_k + R_n) + j\omega(L_k + L_n).$$

Амплітуда струму нормального режиму

$$I_m = \frac{E_m}{\sqrt{(r_k + R_n)^2 + \omega^2(L_k + L_n)^2}},$$

а фаза струму нормального режиму

$$\varphi_k = \arctg \frac{\omega(L_k + L_n)}{r_k + R_n} = \arccos \frac{r_k + R_n}{\sqrt{(r_k + R_n)^2 + \omega^2(L_k + L_n)^2}}.$$

Тоді струм попереднього режиму:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi_k).$$

Струм має індуктивний характер і відстає від напруги на кут φ_k , звідси можна знайти початкове значення струму:

$$I(0) = -I_m \sin \varphi_k.$$

При побудові електронної таблиці використовуємо для інтегрування метод Ейлера, що відповідає рекурентному співвідношенню

$$i(t_k + \Delta t) = i(t_k) + \Delta t \frac{di(t_k)}{dt}.$$

Похідні $\frac{di}{dt}$ обчислюються по правій частині диференціального рівняння, представленого у формі завдання Коші. Це рівняння, як для нормального режиму, так і для режиму короткого замикання, можна представити в єдиній формі зі змінними параметрами:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (E_m \sin \omega t - R i).$$

Тут для нормального режиму $L = L_k + L_n$; $R = r_k + R_n$, а для режиму короткого замикання $L = L_k$; $R = r_k$.

Момент виникнення короткого замикання будемо задавати мо-

ментом t_k , причому $t_k > T = \frac{2\pi}{\omega}$, що дозволить відстежити період нормального режиму, що встановився. Для визначення величини ударного струму слід зі значень струму ТФКЗ відібрати значення максимального абсолютного значення струму, що в електронних таблицях можна реалізувати за допомогою вбудованої функції МАКСИМУМ(), яка з ряду значень відбирає максимальне. Розрахунки режиму ТФКЗ слід здійснювати до загасання перехідного процесу, тривалість інтервалу цього процесу може бути визначена орієнтовно як $(3 \div 5)\tau_k = (3 \div 5)\frac{L_k}{r_k}$.

Задача визначення максимуму ударного струму може розглядатися як задача чисельної параметричної оптимізації. В цій задачі як критерій оптимізації на досягнення максимуму використовується величина ударного струму, що визначається за допомогою функції МАКСИМУМ(), а параметром оптимізації є момент виникнення ТФКЗ. Ця оптимізаційна задача в такій постановці може бути вирішена в електронних таблицях MS Excel за допомогою функції «Пошук рішення» [3].

Процедура рішення поставленої задачі може бути виконана поетапно:

1. Введення вихідних даних у клітини й присвоєння цим клітинам власних імен (zem, w, zlk, zrk, zlh, zrh), щоб уникнути зрушення їх адрес при копіюванні формул моделі процесу.

2. Задання тимчасових параметрів – кроку інтегрування й моменту виникнення ТФКЗ (імена DLT і ztk).

3. Обчислення косинусів фазних кутів для нормального й аварійного режимів (орієнтовно для нормального режиму $\cos \varphi = 0,8$, для аварійного $\cos \varphi = 0,1$).

4. Обчислення початкового значення струму нормального режиму $i(0)$.

5. Створення стовпців дискрет часу наростаючого із кроком Δt і напруги живильної мережі.

6. Створення стовпців індуктивності L і опору R, значення яких повинні обчислюватися за допомогою логічної функції MS Excel ЕСЛИ() таким чином, щоб до моменту ТФКЗ ці значення були рівні відповідно $(L_k + L_n)$ і $(r_k + R_n)$, а після моменту $t_k - L_k$ і r_k .

7. Створення стовпця струму з початковим значенням $i(0)$, яке

вже було обчислено раніше, і з розрахунками на наступному кроці за формулою Ейлера для інтегрування диференціального рівняння.

8. Створення стовпця для похідної струму, обчислюють за відповідними формулами правої частини диференціального рівняння.

9. Перевірка діаграм напруги і струму й залежності їх вигляду від моменту ТФКЗ .

10. Створення стовпця, що відбирає максимальне значення струму ТФКЗ, яке й приймемо за величину ударного струму.

11. Використання функції "Пошук розв'язку" для визначення моменту виникнення ТФКЗ, який приводить до максимального значення ударного струму короткого замикання.

На рис.2 наведено розрахунки за наведеною вище процедурою розв'язку поставленого завдання. В лівій частині таблиці введені початкові значення індуктивностей і опорів при нормальному режимі й при короткому замиканні, амплітуда синусоїдального джерела напруги, крок інтегрування й початковий момент короткого замикання. Розраховані косинус кута зрушення між струмом і напругою в мережі й струм нормального режиму, а також реактивні опори й кути зрушення при нормальному режимі й при короткому замиканні з використанням відповідних формул.

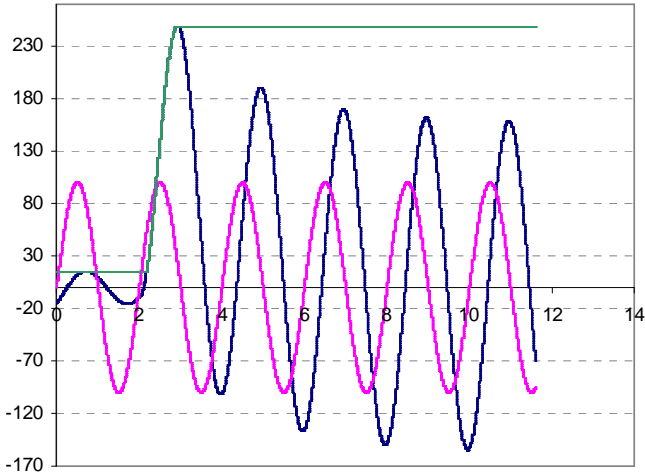
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Исходные данные			Амплитуда тока нормального режима				15,76765		
2	Em	100								
3	Lк	0,2		Начальное значение тока нормального режима i(0)				-15,5717		
4	Lн	1								
5	гк	0,1		Ударный ток				248,88603		
6	Rн	5								
7	w	3,141592654		time	i	Em sin wt	Imax	di/dt	L	R
8	dlt	0,001		0	-15,57166424	0	15,571664	66,17957	1,2	5,1
9	tk	3,0225843		0,001	-15,50548466	0,3141587	15,571664	66,16011	1,2	5,1
10				0,002	-15,43932456	0,6283144	15,571664	66,14072	1,2	5,1
11	zk	0,636226513		0,003	-15,37318383	0,9424638	15,571664	66,12142	1,2	5,1
12	fik	1,412965137		0,004	-15,30706241	1,256604	15,571664	66,10219	1,2	5,1
13	cos fik	0,157176725		0,005	-15,24096023	1,5707317	15,571664	66,08302	1,2	5,1
14				0,006	-15,1748772	1,884844	15,571664	66,06393	1,2	5,1
15	zn	5,90504906		0,007	-15,10881327	2,1989376	15,571664	66,0449	1,2	5,1
16	fn	0,560982116		0,008	-15,04276837	2,5130095	15,571664	66,02594	1,2	5,1
17	cos fn	0,846733016		0,009	-14,97674243	2,8270567	15,571664	66,00704	1,2	5,1
18				0,01	-14,91073539	3,1410759	15,571664	65,98819	1,2	5,1
19	tg fn	0,739198271		0,011	-14,8447472	3,4550641	15,571664	65,96994	1,2	5,1
20	tg fik	6,283185307		0,012	-14,77877781	3,7890183	15,571664	65,95065	1,2	5,1

Рис. 2

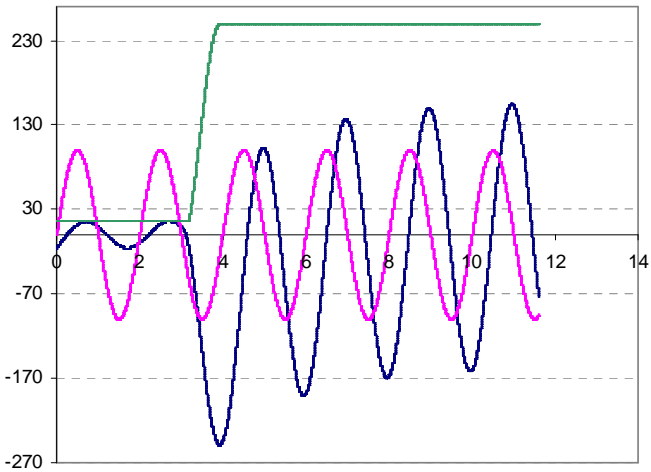
Побудовані стовпці розрахунків часу, індуктивності й напруги (які змінюються в момент короткого замикання), живильної напруги, вихідного струму і його похідної, стовпець зі значеннями ударного струму. Початкове значення стовпця ударного струму задається рівним абсолютному значенню поточного значення вихідного струму.

Потім відбувається порівняння попереднього значення ударного струму і поточного значення модуля вихідного струму, після чого максимальне з них заноситься в наступні клітини стовпця ударного струму.

На рис.3 наведено часові діаграми живильної напруги, струму й ударного струму.



а



б

Рис.3

У параметрах функції "Пошук розв'язку" було встановлено: граничне число ітерацій – 1000, припустиме відхилення – 0,5 %, оцінка – квадратична, різниці – центральні, метод пошуку – спряжених градієнтів. Знайдено максимальні значення ударного струму при заданні різних моментів короткого замикання з використанням функції "Пошук розв'язку".

Було встановлено, що при заданні $t_{кз} = 2,1$ після оптимізації ця величина встановлюється $t_{кз} = 2,02$, значення ударного струму при цьому стає позитивним і рівним 248 (рис.3, а), при цьому перехідний процес носить спадаючий характер, як це наведено на рис.2. При заданні $t_{кз} = 2,7$ після оптимізації ця величина встановлюється $t_{кз} = 3,0288$ і значення ударного струму при цьому стає від'ємним, рівним -248, при цьому перехідний процес носить зростаючий характер (рис.3, б).

Таким чином, наведена методика аналізу режиму трифазного короткого замикання в нерозгалуженому ланцюзі дозволяє зробити відповідні розрахунки в електронних таблицях MS Excel. При аналізі було забезпечено розрахунки попереднього режиму живлення навантаження й режиму короткого замикання, наочно відображених на рис.3. Було вирішено завдання пошуку моменту короткого замикання, при якому ударний струм є максимальним.

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.

2. Крючков И.П., Неклепаев Б.Н., Старшинов В.А. и др. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 416 с.

3. Вильям Орвис. EXCEL для ученых, инженеров и студентов. – К.: Юниор, 1999. – 528 с.

Отримано 08.12.2010

УДК 628.971:351.811.111.5

В.Ф.ХАРЧЕНКО, В.Г.ЯГУП, доктора техн. наук,
Н.И.ШПИКА, канд. техн. наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ РАБОТЫ УСТАНОВОК НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Рассмотрены вопросы электроснабжения и управления режимом работы установок наружного освещения с применением в качестве коммутационных аппаратов тиристорных контакторов.

Розглянуто питання електропостачання та управління режимом роботи установок зовнішнього освітлення із застосуванням у якості комутаційних апаратів тиристорних контакторів.