

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З ДУГОВИМ РОЗРЯДОМ

Ягуп В. Г.¹, Ягуп К. В.²

¹Харківський національний університет міського господарства імені О. А. Бекетова,

²Український державний університет залізничного транспорту

У статті розглядається система електропостачання, що містить елемент з дуговим розрядом. За системою нелінійних диференціальних рівнянь для дугового розряду складена візуальна модель, що придатна для зв'язку з елементами бібліотеки SimPowerSystem. Оптимізація режиму полягає в компенсації реактивної потужності по основній гармоніці з використанням алгоритму Нелдера-Міда.

Постановка проблеми. Дуговий розряд широко застосовується для плавки та очищення металів. З дуговим розрядом працюють також установки електрозварювання та освітлювальні прилади, що широко застосовуються у забезпеченні функціонування обладнання сільського господарства. Дослідження процесів в електричних установках з дуговим розрядом необхідно для їх проектування з метою підвищення їх енергетичних показників і надійності. Однак, розрахунок електромагнітних процесів в системах електропостачання з дуговим розрядом являє собою досить складну задачу аналізу нелінійної динамічної системи. Використання математичних методів і комп'ютерних засобів дозволяє вирішувати ці завдання в самій різноманітній постановці завдання.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Вольт-амперна характеристика дугового розряду є суттєво нелінійною [1-5], що обумовлює нелінійний характер струмів і напруг в системі електропостачання з дуговим розрядом. Це в свою чергу позначається на струмі, який споживається від живильної мережі змінного струму. Як правило, в системах живлення елемент з дуговим розрядом підключається до мережі через струмообмежувальний елемент. В якості такого струмообмежувального елемента зазвичай використовується дросель [3-5]. Такий струмообмежувальний елемент практично не споживає активної потужності. У той же час наявність індуктивного обмежувача призводить до появи в системі реактивної потужності. Реактивну потужність створює і сам елемент з дуговим розрядом. Фізично це пояснюється тією обставиною, що струм в елементі з дуговим розрядом з'являється в кожному півперіоді лише тоді, коли напруга на елементі досягне напруги запалювання дуги. Це обумовлює зрушення основної гармоніки струму щодо напруги живлення і призводить до появи в системі електропостачання додаткової реактивної потужності [3,4]. Втрати від зазначених явищ можуть бути значними. Установки плавки та очищення металів споживають значні потужності від мережі. У разі освітлювальних приладів їх кількість може бути досить велике. Тоді сумарна потужність споживання виявляється істотною, і рівні споживаної реактивної потужності доцільно знижувати.

Метою статті є розрахунок компенсованого по основній гармоніці оптимального режиму електрожи-

влення елемента з дуговим розрядом за допомогою оптимізаційних алгоритмів і математичної моделі в системі SimPowerSystem.

Основний матеріал дослідження. В основу моделі покладені нелінійні рівняння [6], що описують вольт-амперну характеристику дугового розряду у формі звичайних диференціальних рівнянь:

$$k_1 r^n + k_2 r \frac{dr}{dt} = \frac{k_3}{r^{m+2}} i^2, \quad (1)$$

де r – радіус дуги,

i – струм через дугу,

k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти, що визначають параметри вольт-амперної характеристики дугового розряду. $m=0, n=2$.

Провідність g стовпа дуги визначається величиною, зворотною до коефіцієнта при квадраті струму в правій частині рівняння:

$$g = \frac{r^{m+2}}{k_3}. \quad (2)$$

Слід також додати залежність напруги на дузі від струму, яку тепер можна виразити через провідність дуги в формі звичайного компонентного рівняння:

$$v = \frac{i}{g}. \quad (3)$$

Для побудови візуальної моделі дугового розряду приведемо рівняння (1) до нормальної форми, відокремивши першу похідну від змінної в лівій частині диференціального рівняння:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{k_2 r} \left(\frac{k_3}{r^2} i^2 - k_1 r^2 \right) \quad (4)$$

Побудована за цим рівнянням візуальна модель наведена на рис. 1.

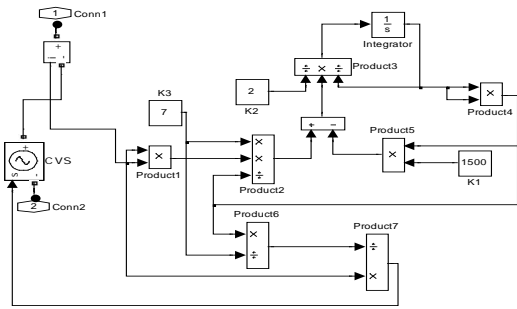


Рисунок 1 - Візуальна модель елемента з дуговим розрядом

Залежний джерело напруги CVS використовується для того, щоб отримати модель дугового розряду, сумісну з бібліотекою SimPowerSystem. Тепер клемі Conn1 і Conn2 слугують для приєднання отриманої моделі до інших елементів із зазначеної бібліотеки елементів SimPowerSystem (рис.2)

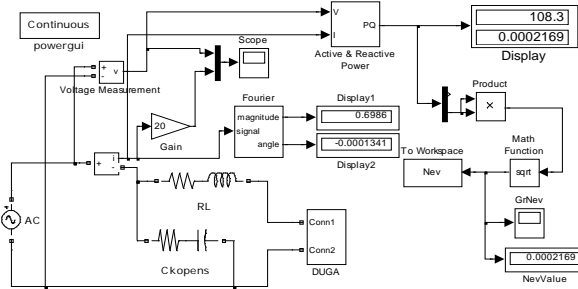


Рисунок 2 - Система живлення елемента з дуговим розрядом після завершення оптимізації.

У наведеній моделі активно-індуктивний елемент RL являє обмежувальний дросель, активно-ємнісний елемент $Ckompens$ моделює конденсатор, призначений для компенсації реактивної потужності по основній гармоніці. Параметри моделі і схеми наступні:

$$k_1=1500; k_2=2; k_3=7; E_m=310V; f=50Hz;$$

$$R_L=R_C=0.010\Omega; L=0.48H;$$

При відключеному компенсуючому пристрої сталий режим характеризується такими параметрами: амплітуда основної гармоніки струму, споживаного від джерела $I_{Im} = 1.647 A$; споживана джерела активна потужність $P_E = 108.3W$; реактивна $Q_E = 231.2 VA$; $\cos \varphi = 0.424$.

На рис.3 показані діаграми живильної напруги і струму в лінії електропередачі і в джерелі живлячої напруги при відсутності компенсуючого пристрою. Напруга джерела живлення, в якості котрого в моделі використовується джерело напруги AC , зображена на часовій діаграмі пунктирною лінією. Струм відображається суцільною лінією в масштабі 100 (коефіцієнт множення на моделі забезпечується блоком підсилення, який ввімкнений перед віртуальним осцилографом). Цей струм досягає свого максимального значення 1.6803 A, що незначно відрізняється від амплітуди основної гармоніки цього струму.

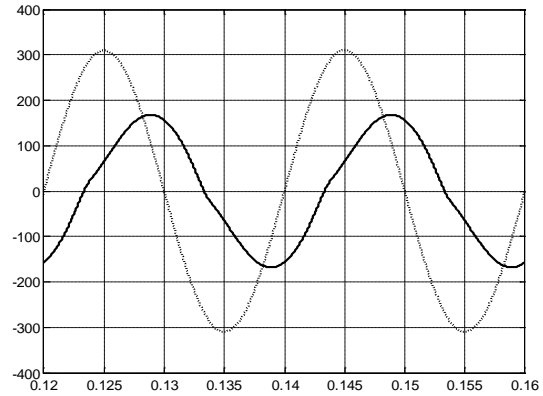


Рисунок 3 – Напруга і струм джерела живлення дуги при відсутності компенсуючого пристрою

Для пошуку режиму компенсації реактивної потужності і параметрів компенсуючого пристрою використовуємо вбудовану функцію оптимізації за алгоритмом Нелдера-Міда. З цією метою підключимо прилад, що вимірює напругу джерела, і виділяє основну гармоніку струму в мережі. Це в свою чергу дає можливість обчислити активну і реактивну складові потужності джерела. Для формування цільової функції, яка повинна бути мінімізована, використовується модуль реактивної потужності. Значення цільової функції обчислюється в процесі прогону моделі протягом 8 періодів, що є достатнім для встановлення процесу в системі. Крок інтегрування 0.00001 с; використовується метод інтегрування ode23s. Після обчислення цільової функції її значення передається в робочий простір, де його використовує функція $fminsearch()$. В якості параметра оптимізації виступає значення ємності конденсатора компенсуючого пристрою. Текст основної функції main на мові програмування завдань Matlab наступний:

```

warning off
global Ckomp Nst
Nst=0
Y=fminsearch('func_s3fnesim',[1])
Nst

```

Тут в якості глобальних змінних оголошені величина ємності компенсуючого конденсатора і змінна Nst, що підраховує число звернень до обчислення цільової функції. Далі йде виклик функції оптимізації, де в якості двох параметрів вказані ім'я допоміжної функції, що доставляє значення цільової функції, і початкове значення параметра оптимізації.

Текст допоміжної функції:

```

function Nev=func_s3fnesim(x)
global Ckomp Nst
Ckomp=abs(x(1)*1E-6)
sim duga_06optim
Nev
Nst=Nst+1

```

Тут повторено опис глобальних змінних, як цього вимагає синтаксис мови програмування завдань Matlab. Далі параметр оптимізації використовується для перерахування значення ємності конденсатора S_{comp} . Це ім'я використовується у вікні параметрів елементів компенсуючого пристрою моделі. Після цього оператор *sim* викликає на виконання модель, представлена на рис.2. На вказаному малюнку прилади показують значення, досягнуті в процесі оптимізації. Знайдена ємність конденсатора, при якій забезпечується повна компенсація реактивної потужності по основній гармоніці, становить 15.4 мкФ.

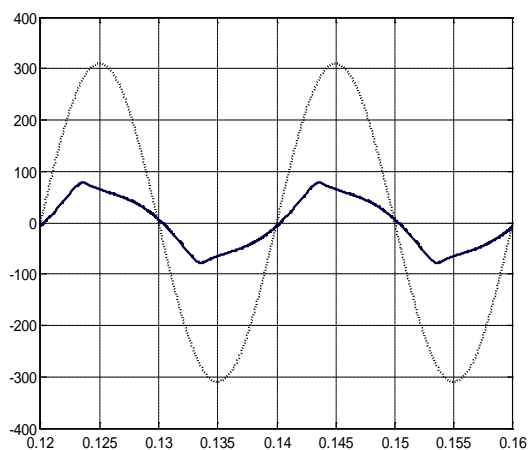


Рисунок 4 – Напряга і струм джерела живлення дуги під час підключення компенсуючого пристрою

На рис.4 наведені діаграми живильної напруги і струму в лінії електропередачі і в джерелі живлячої напруги при наявності компенсуючого пристрою. Напряга джерела живлення зображена на часовій діаграмі пунктирною лінією. Струм відображається суцільною лінією в тому ж масштабі 100. В цьому випадку струм досягає свого максимального значення 0.7792 А. При цьому амплітуда основної гармоніки струму, споживаного від джерела $I_{Im} = 0.6987$ А; споживана від джерела активна потужність $P_E = 108.3$ W; реактивна $Q_E = 0.0002169$ VA; $\cos \varphi = 1.0$. Значне зменшення струму, споживаного в цьому випадку від мережі, означає суттєве зменшення втрат електричної енергії.

Слід зазначити, що гармонічний склад струму джерела живлення залишається в обох випадках незмінним. Фізично це обумовлено тією обставиною, що конденсатор компенсуючого пристрою споживає виключно синусоїдальний струм, що не може спричинити зміну гармонічного складу у порівнянні з некомпенсованим режимом.

Висновки

1. Для вирішення завдання оптимізації режиму в системі електропостачання з елементом дугового розряду розроблена Simulink-модель дугового розряду.
2. За допомогою залежного джерела напруги модель дугового розряду представлена у вигляді, сумісному з елементами SimPowerSystem.
3. Використання моделі системи електропостачання

спільно з функцією оптимізації *fminsearch()* дозволяє обчислити параметри компенсуючого елемента, що забезпечує компенсацію реактивної потужності по основній гармоніці.

4. В оптимальному режимі значно зменшується амплітуда першої гармоніки споживаного від мережі струму, що зменшує втрати електроенергії в системі електропостачання.

Список використаних джерел

1. Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.: Иностранная литература, 1955. – 714 с..
2. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутациях электрических цепей. – М.: Высшая школа, 1967. – 195 с.
3. Лесков, Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г.И. Лесков. – М.: Машиностроение, 1970. – 215 с.
4. Уэймаус Д. Газоразрядные лампы. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
5. Фугенфиров М. И. Электрические схемы с газоразрядными лампами. – М.: Энергия, 1974. – 368 с.
6. E. Acha, A. Semlyen, N. Rajakovic, "A Harmonic domain Computational Package for Nonlinear problems and Its Application to Electric Arcs", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 3, July. 1990, pp. 1390-1397.

Аннотация

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ

Ягуп В. Г., Ягуп Е. В.

В статье рассматривается система электропитания, содержащий элемент с дуговым разрядом. По системе дифференциальных нелинейных уравнений для дугового разряда составлена визуальная модель, пригодная для связи с элементами библиотеки SimPowerSystem. Оптимизация режима заключается в компенсации реактивной мощности по основной гармонике с использованием алгоритма Нелдера-Мида.

Abstract

MODELING AND REGIME OPTIMIZATION OF ELECTRICAL SYSTEM WITH ARC DISCHARGE

V. Yagup, K. Yagup

The article discusses the power supply system, containing elements with arc discharge. According to system of nonlinear differential equations for the the arc discharge drawn up visual model, suitable for communication with the library elements SimPowerSystem. Optimization of the regime is to compensate the reactive power for the fundamental frequency using the Nelder-Mead algorithm.