

УДК 521.3.01

В.Ф.Резцов, чл.-кор. НАН України, **Т.В.Суржик**, канд.техн.наук (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ),

М.С.Теймуразян (Національний технічний університет України "КПІ", Київ)

Аналіз розповсюдження вищих гармонійних складових напруг і струмів у кабельних лініях фотоелектричних станцій та засобів обмеження їх впливу на оточуюче середовище

Функціонування фотоелектричних станцій (ФЕС) супроводжується появою вищих гармонійних складових напруг і струмів у кабельних лініях ФЕС. На основі аналізу моделей процесів розповсюдження вищих гармонійних складових у двопровідних довгих лініях рекомендується використання напівпровідникових фільтруючих пристроїв, а також електромагнітних екранів для обмеження негативного впливу вищих гармонік на оточуюче середовище та обслуговуючий персонал ФЕС.

Ключові слова: фотоелектрична станція, кабельна лінія, вищі гармонійні складові, електромагнітний екран.

Функционирование фотоэлектрических станций (ФЭС) сопровождается появлением высших гармонических составляющих напряжений и токов в кабельных линиях ФЭС. На основе анализа моделей процессов распространения высших гармонических составляющих в двухпроводных длинных линиях рекомендуется использование полупроводниковых фильтрующих устройств, а также электромагнитных экранов для ограничения отрицательного влияния высших гармоник на окружающую среду и обслуживающий персонал ФЭС.

Ключевые слова: фотоэлектрическая станция, кабельная линия, высшие гармонические составляющие, электромагнитный экран.

Вступ. Останнім часом було встановлено, що у внутрішніх електричних мережах фотоелектричних станцій (ФЕС) – як у кабельних лініях постійного струму з низькою напругою, так і в кабельних лініях змінного струму з високою напругою – існують вищі гармонійні складові напруг і, відповідно, струмів [1].

Це може призвести не тільки до негативного впливу на системи комп'ютерного управління і зв'язку на ФЕС, але й до негативного впливу на оточуюче середовище та обслуговуючий персонал ФЕС [2].

Постановка задач дослідження. Нижче розглянуто дві модельні задачі. Суть першої з них полягає в аналізі згасання високочастотних складових напруги та струму в двопровідній довгій лінії з розподіленими параметрами (рис. 1) з метою визначення точок встановлення напівпровідникових пристроїв, що компенсують вищі гармоніки [3]. Друга задача стосується обґрунтування вибору електромагнітних екранів для захисту оточуючого середовища від вищих гармонійних складових електричного та магнітного полів [2].

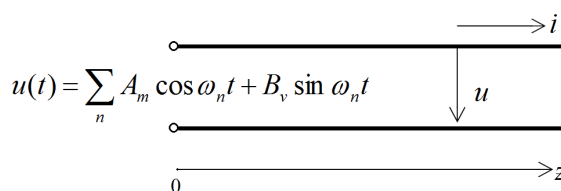


Рис. 1. Модель довгої лінії із розподіленими параметрами.

Згідно з [4] система рівнянь для напруги у довгій лінії $u(z, t)$ і струму $i(z, t)$ має вигляд:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial z} &= r i + L \frac{\partial i}{\partial t}, \\ -\frac{\partial i}{\partial z} &= g u + C \frac{\partial u}{\partial t}, \end{aligned} \tag{1}$$

де r, g, L, C – відповідно погонний опір, погонна провідність, погонна індуктивність та погонна ємність, які покладаються постійними.

Функція $u(t)$, яка являє собою значення напруги на початку лінії (при $z = 0$), розкладається у ряд Тейлора по синусоїдальних функціях. Тоді для виділеної частоти ω вхідну напругу $u(t, z = 0)$, а також напругу $u(z, t)$ і струм $i(z, t)$ можна представити у вигляді добутку відповідних комплексних амплітуд та комплексної експоненти:

$$\begin{aligned} u(t, z = 0) &\rightarrow \dot{U}_{a0} \exp(i\omega t), \\ u(z, t) &\rightarrow \dot{U}_a \exp(i\omega t), \\ i(z, t) &\rightarrow \dot{I}_a \exp(i\omega t), \\ i^2 &= -1. \end{aligned} \tag{2}$$

Підставляючи (2) в (1), отримуємо систему звичайних диференціальних рівнянь для $\dot{U}_a(z)$ і $\dot{I}_a(z)$:

$$\begin{aligned} -\frac{d\dot{U}_a(z)}{dz} &= (\kappa + i\omega L)\dot{I}_a, \\ -\frac{d\dot{I}_a(z)}{dz} &= (g + i\omega C)\dot{U}_a, \end{aligned} \tag{3}$$

з якої можна отримати рівняння тільки для $\dot{U}_a(z)$ та $\dot{I}_a(z)$ з однаковою структурою:

$$\begin{aligned} -\frac{d^2\dot{U}_a(z)}{dz^2} + k^2\dot{U}_a(z) &= 0, \\ \frac{d^2\dot{I}_a(z)}{dz^2} + k^2\dot{I}_a(z) &= 0, \\ k^2 &= (\omega^2 LC - gr) - i\omega(gL + rC). \end{aligned} \tag{4}$$

З (4) видно, що загальне рішення рівнянь для $\dot{U}_a(z)$ і $\dot{I}_a(z)$ має однакою структуру:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{A} \exp(+ikz) + \dot{B} \exp(-ikz), \\ \dot{A} &= \text{const}, \quad \dot{B} = \text{const}, \\ \dot{I}_a &= \dot{M} \exp(+ikz) + \dot{N} \exp(-ikz), \\ \dot{M} &= \text{const}, \quad \dot{N} = \text{const}. \end{aligned} \tag{5}$$

Слід зазначити, що комплексні константи \dot{A}, \dot{B} з одного боку та \dot{M}, \dot{N} з іншого боку, які визначаються з граничних умов, не є незалежними, а пов'язані з рівняннями (3). Тобто, якщо визначено розподіл $\dot{U}_a(z)$, то $\dot{I}_a(z)$ визначається простим диференціюванням $\dot{U}_a(z)$ по z .

Як видно з (5), характер зміни комплексних амплітуд напруги \dot{U}_a та струму \dot{I}_a від просторової координати z залежить від значення параметра k , який у загальному випадку є комплексним ($k = \alpha + i\beta$), де величини α і β визначаються з наступних рівнянь:

$$\begin{aligned} \alpha^2 - \beta^2 &= \omega^2 LC - gr, \\ 2\alpha\beta &= -\omega(gL + rC). \end{aligned} \tag{6}$$

Оскільки функції $\exp(+ikz)$ та $\exp(-ikz)$ в термінах параметрів α, β мають вигляд

$$\begin{aligned} \exp(+ikz) &= \exp(-\beta z)[\cos \alpha z + i \sin \alpha z], \\ \exp(-ikz) &= \exp(+\beta z)[\cos \alpha z - i \sin \alpha z], \end{aligned} \tag{7}$$

то з (7) випливає, що параметр α визначає синусоїдальну зміну комплексних амплітуд $\dot{U}_a(z), \dot{I}_a(z)$ по координаті z , а параметр β може визначати як експоненціальне падіння, так і експоненціальне зростання по координаті z .

Зі згаданого вище випливає, що для запобігання розповсюдженню вищих гармонійних складових по лінії, яка зв'язує ФЕС з енергосистемою, раціонально встановлювати фільтруючі пристрої [3] на виході з ФЕС (якщо ФЕС є причиною вищих гармонік), або на вході в енергосистему (якщо причиною вищих гармонік є енергосистема) з відповідними параметрами по частоті фільтрів вищих гармонік, їх напругах та потужностях.

Аналіз розподілу електромагнітних полів в оточуючому середовищі поблизу кабельних ліній ФЕС. Для цього аналізу розглянемо схему, наведену на рис. 2.

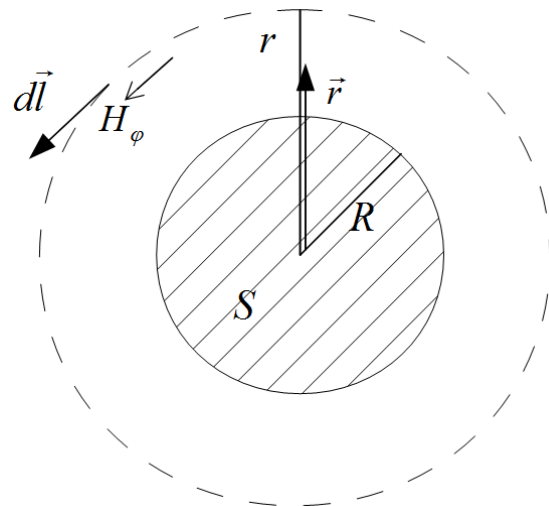


Рис. 2. Схема розподілу електромагнітних полів у оточуючому середовищі поблизу кабельних ліній ФЕС.

Згідно з цією схемою можна використати закон повного струму:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I. \tag{8}$$

Тут I – повний струм через площину S (площу перетину жили кабелю), яка охоплена замкнутим контуром L з елементарною дотичною $d\vec{l}$. Для циліндричної жили кабелю, яка направлена вздовж осі z , напруженість магнітного поля на обертовому контурі з радіусом r внаслідок умов симетрії має тільки азимутальну складову H_φ .

Згідно з (8), величина азимутальної складової напруженості магнітного поля H_φ зменшується обернено пропорційно відстані від центра жили кабелю r ($H_\varphi = \frac{I}{2\pi r}$).

Знаючи залежність величини H_φ від r , можна використовувати перше рівняння Максвелла

$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ у циліндричній системі координат [4] для середовища з електричною провідністю σ та діелектричною проникністю ε з урахуванням умов обертової симетрії по координаті φ :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rH_\varphi) = \sigma E_z + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t}. \tag{9}$$

Як видно з (9), із рівняння (9) після введення комплексних амплітуд:

$$\dot{H}_{\varphi a}(H_\varphi(r, t)) \rightarrow \dot{H}_{\varphi a} \exp(i\omega t),$$

$$\dot{E}_{za}(E_z(r, t)) \rightarrow \dot{E}_{za} \exp(i\omega t)$$

можна визначити величину \dot{E}_{za} :

$$\dot{E}_{za} = \frac{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\dot{H}_{\varphi a})}{\sigma + i\omega\varepsilon}. \tag{10}$$

Із (10) видно, що величини $\dot{E}_{za}(r)$, $E_z(r, t)$, а також величина радіальної компоненти вектора Умова-Пойнтінга $\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H}$ теж зменшується зі збільшенням r . Із вищезгаданого випливає висновок про те, що для зменшення негативного впливу електричного та магнітного полів, а також величини модуля радіальної скла-

дової вектора Умова-Пойнтінга, який пов'язаний з густиною тепловиділення на оточуюче середовище та персонал ФЕС, необхідно збільшувати глибину залягання кабелів ФЕС під землею.

Обґрунтування параметрів електромагнітного екранування вищих гармонійних складових кабельних ліній ФЕС. Якщо відстань встановлення електромагнітних екранів на поверхні землі або у кабельних каналах значно перевищує характерний розмір жил кабелів R , то тоді електромагнітна хвиля на внутрішній поверхні електромагнітного екрану фактично є плоскою при перпендикулярному (найбільш інтенсивному) або похилому падінні. Виходячи з цього, для оцінки ефективності застосування електромагнітних екранів достатньо розглянути процес взаємодії плоскої електромагнітної хвилі з пластиною (рис. 3), яка характеризується електричною провідністю σ .

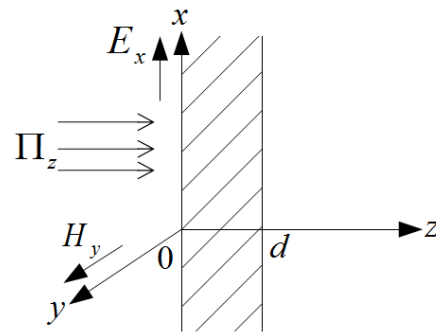


Рис. 3. Схема взаємодії плоскої електромагнітної хвилі з пластиною.

Для даної моделі декартова координата z відповідає радіальній координаті r для моделі кабелю, а E_x, H_y, Π_z відповідають E_x, H_φ, Π_r .

Згідно моделі, представленій на рис. 3, система рівнянь Максвелла для провідного середовища [4]:

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E}, \quad \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \tag{11}$$

$$\sigma = \text{const}, \quad \mu = \text{const}$$

із наближенням плоскої електромагнітної хвилі трансформується у наступну систему рівнянь відносно $E_x(z, t), H_y(z, t)$:

$$-\frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x; \quad -\frac{\partial E_x}{\partial z} = \mu \frac{\partial H_y}{\partial t}. \tag{12}$$

Після введення комплексних амплітуд $\dot{E}_{xa}(z)$, $\dot{H}_{ya}(z)$ згідно співвідношень:

$$\begin{aligned} E_x(z, t) &\rightarrow \dot{E}_{xa}(z) \exp(i\omega t), \\ H_y(z, t) &\rightarrow \dot{H}_{ya}(z) \exp(i\omega t), \end{aligned} \quad (13)$$

$$i^2 = -1$$

система рівнянь (12) трансформується у систему вигляду:

$$\begin{aligned} -\frac{d\dot{H}_{ya}}{dz} &= \sigma \dot{E}_{xa}, \\ -\frac{d\dot{E}_{xa}}{dz} &= i\omega\mu \dot{H}_{ya}. \end{aligned} \quad (14)$$

У свою чергу, система (14) трансформується до рівнянь, структура яких ідентична (4):

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{H}_{ya}}{dz^2} + k^2 \dot{H}_{ya} &= 0, \\ \frac{d^2 \dot{E}_{xa}}{dz^2} + k^2 \dot{E}_{xa} &= 0, \end{aligned} \quad (15)$$

$$k^2 = -i\omega\mu\sigma.$$

Загальний розв'язок рівнянь (15) також може бути представлений у вигляді (5). Наприклад, для \dot{E}_{xa} він має вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{xa}(z) &= \dot{A} \exp(+ikz) + \dot{B} \exp(-ikz), \\ k^2 &= -i\omega\mu\sigma. \end{aligned} \quad (16)$$

Різниця полягає в тому, що в (16) величина k^2 є уявною величиною, а рівняння для α, β в $k = \alpha + i\beta$ мають вигляд:

$$\begin{aligned} \alpha^2 &= \beta^2, \\ 2\alpha\beta &= -\omega\mu\sigma. \end{aligned} \quad (17)$$

З (17) випливає, що значення α, β визначаються виразами:

$$\begin{aligned} \alpha &= \pm\beta, \\ \beta &= \pm\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Для електромагнітного екрану, який займає півпростір $0 < z < \infty$, необхідно обмежити зростання $\dot{E}_{xa}(z)$ при $z \rightarrow \infty$, яке може бути обумовлене зростанням $\exp(+ikz)$ або $\exp(-ikz)$ при позитивних або від'ємних значеннях параметра β в (18). Тому для випадку півпростору

необхідно одну з констант, \dot{A} або \dot{B} в (16), покласти рівною нулю. Тоді вираз для $\dot{E}_{xa}(z)$ в (16) прийме вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{xa}(z) &= \dot{A} \exp(-\beta z) [\cos \alpha z \pm i \sin \alpha z], \\ \beta &= \pm\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Постійна \dot{A} в (19) визначається значенням комплексної амплітуди напруженості електричного поля на внутрішній поверхні екрану. Тобто $\dot{A} = \dot{E}_{xa}(z=0)$.

Таким чином,

$$\begin{aligned} \dot{E}_{xa}(z) &= \dot{E}_{xa}(z=0) \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} z\right) \times \\ &\times \left[\cos\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} z \pm i \sin\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} z\right], \end{aligned} \quad (20)$$

і ефективність застосування електромагнітного екрану визначається показником експоненти у (20) і зростає за збільшенням електричної провідності σ та магнітної проникності матеріалу екрану μ .

При кінцевій товщині екрану d , основною метою якого є суттєве зменшення відношення $\dot{E}_{xa}(z) / \dot{E}_{xa}(z=0)$ при збільшенні товщини екрану, залежністю (20) можна користуватися і для екранів напівнескінченної товщини. Що стосується геометричних форм екранів, то раціонально використовувати екрани у вигляді плоских пластин або коробів у вигляді напівциліндрів для зменшення матеріалоемності у порівнянні з суцільними трубами із заліза або алюмінію.

Висновки. 1. Для аналізу процесів розповсюдження вищих гармонійних складових напруг і струмів у кабельних лініях ФЕС запропоновано модель довгої лінії, в результаті чого наведено рекомендації щодо необхідності встановлення напівпровідникових фільтруючих пристроїв для обмеження амплітуди гармонік.

2. На основі моделі розповсюдження плоских електромагнітних хвиль у півпросторі обґрунтовано застосування електромагнітних екранів на основі матеріалів з високою електричною провідністю для обмеження негативного впливу вищих гармонійних складових у кабель-

них лініях на оточуюче середовище та обслуговуючий персонал ФЕС.

1. *Бекиров Э.А., Колобов С.И.* Анализ параметров установившихся режимов электрических систем генерации электрической энергии фотоэлектростанциями // Техн.электродинамика. Тем.вип. "Силовая электроника и энергоэффективность". – 2011. – С. 11–15.

2. *Манойлов В.Е.* Основы электробезопасности. – Л.: Энергия, 1976. – 344 с.

3. *Шидловский А.К., Новський В.О., Жаркин А.Ф.* Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями / Київ, Інститут електродинаміки НАН України. – 2013. – 378 с.

4. *Нейман Л.Р., Демірчян К.С.* Теоретические основы электротехники. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 402 с.

УДК 662.997

Л.И.Кныш, канд.техн.наук (Днепропетровский национальный университет им. О.Гончара, Днепропетровск)

Влияние тепловой инерционности элементов плоского солнечного коллектора на его энергетические показатели

Проведено исследование влияния тепловой инерционности элементов солнечного коллектора на его энергетические показатели. Математическая модель, построенная на основе уравнения энергии, решалась численно с использованием средне-статистических данных по интенсивности солнечной радиации. Показано существенное влияние тепловой инерционности при локальном рассмотрении работы коллектора. Доказано минимальное влияние теплоёмкости системы на её интегральные энергетические показатели.

Ключевые слова: солнечный коллектор, тепловая инерционность, уравнения теплового баланса, численное решение.

Проведено дослідження впливу теплової інерційності елементів сонячного колектора на його енергетичні показники. Математичну модель, що побудована на основі рівняння енергії, було розв'язано чисельно з використанням середньостатистичних даних щодо інтенсивності сонячної радіації. Показано суттєвий вплив теплової інерційності при локальному розгляді роботи колектора. Доказаний мінімальний вплив теплоємності системи на її інтегральні енергетичні показники.

Ключові слова: сонячний колектор, тепла інерційність, рівняння теплового балансу, чисельне рішення.

Вступление. Солнечный коллектор является основным элементом системы для получения низкопотенциального тепла на основе энергии Солнца. Такое устройство можно считать одним из наиболее популярных среди оборудования альтернативной энергетики. От совершенства конструкции солнечного коллектора в значительной степени зависит эффективность работы всей системы отопления или горячего водоснабжения. Эта конструкция должна обеспечивать максимальное поглощение солнечного излучения и при этом отвечать минимальным тепловым потерям. В то же время надёжное и бесперебойное функционирование гелиосистемы невозможно без правильного подбора и расчёта других её составляющих, таких как теплоаккумулирующий и

расширительный баки, теплоизоляция и трубопроводы, блок автоматики и прочие комплектующие. Работа теплообменных приборов и приборов контроля тесно взаимосвязана и обусловлена. Поэтому согласование их работы с учётом особенности конструкции элементов, климатических условий и времени года является важнейшей технической задачей при монтаже и наладке гелиосистем.

Одним из этапов решения такой задачи можно считать определение временного диапазона, в течение которого необходимо начинать подачу теплоносителя в систему. Очевидно, что существует некоторое "запаздывание" по времени в работе систем на основе гелиоколлекторов (ГК), которое делает реальную температуру теплоно-