

МОДЕЛЮВАННЯ ІНВЕРТОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ З ВРАХУВАННЯМ РОЛІ МЕРЕЖЕВОГО ОБЛАДНАННЯ

Гаєвський О.Ю., проф., Гаєвська Г.М., ст. викладач, Коновалов М.О.,
аспірант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії

Вступ. За останнє десятиліття спостерігається безперервне збільшення кількості фотоелектричних станцій (ФЕС) невеликої потужності, підключених до розподільних мереж (РМ). Такі станції задовольняють необхідні потреби локальних користувачів, внаслідок чого знижується навантаження на розподільчі мережі. Однак при збільшенні сумарної потужності ФЕС та зростанні ступеня їхнього проникнення в енергосистему, підвищується ризик появи перенапруги в мережі, пов'язані з інтенсивною сонячною радіацією при малому споживанні електроенергії, або навпаки при недостатній інсоляції виникає зниження напруги у вузлу підключення. У складі сучасних станцій використовують смарт-інвертор, який має функцію стабілізації вихідної напруги за допомогою регулювання реактивної потужності.

Мета роботи. Дослідження регулювання вихідної напруги інвертора шляхом компенсації реактивної потужності при заданих різних характеристиках мережевого обладнання, а саме: параметрів підвищувальних трансформаторів і пропускної спроможності електричних ліній.

Матеріали і результати досліджень. Зростання кількості підключень ФЕС до РМ призвело до необхідності вирішення проблем якості електроенергії, стабільності і безпеки самих електричних мереж, а саме:

- підтримання рівня відхилення напруги в точці підключення ФЕС в допустимих межах;
- недопущення критичних станів електромережі по частоті шляхом управління активною потужністю;
- стабілізація режиму електромережі засобами ФЕС.

Використання смарт-інверторів достатньо ефективно вирішує задачу підтримки рівня відхилення напруги в точці підключення ФЕС в допустимих межах. Основним критерієм, за яким відбувається відключення інверторів ФЕС, є вихід значення напруги та частоти змінного струму за допустимі значення для інверторного обладнання. Відповідно до більшості стандартів (наприклад, [1]) гранично допустимими є відхилення від номінальної напруги на рівні $\pm 10\%$ та відхилення за частотою ± 1 Гц від номінальних значень. В точці підключення ФЕС спостерігається підвищення або зниження напруги і саме смарт-інвертором можна компенсувати коливання. Інвертори при порушенні частотного режиму, можуть самостійно підключатися або відключатися від мережі, підтримувати заданий рівень реактивної потужності, що генерується або споживається, та регулювати напругу в точці підключення шляхом модуляції реактивної потужності [2, 3]. При цьому додатково з активною потужністю P_{inv} в точку підключення ФЕС видається реактивна

потужність Q_{inv} (позитивна або негативна) у межах, визначених співвідношенням [2]:

$$|Q_{inv,lim}| = \sqrt{S_{inv,n}^2 - P_{inv}^2}$$

де $S_{inv,n}$ – номінальна потужність інвертора.

Очевидно, що граничні значення Q_{inv} досягаються при нульовій вихідній потужності інвертора $P_{inv} = 0$ (наприклад, коли фотогенерація відсутня). У разі ж $P_{inv} = S_{inv,n}$ (максимальна фотогенерація) ресурс інвертора за реактивною потужністю нульовий. Однак це обмеження знімається при використанні інвертора з запасом S_n щодо максимальної потужності фотогенерації, яка визначається установчою потужністю масиву фотомодулів станції.

В якості моделі в даній роботі розглядалася спрощена схема заміщення з декількома вузлами (рис. 1). За результатами розв'язку рівнянь усталеного режиму для неї при варіації реактивної потужності інвертора (як в сторону відставання, так і випередження), тобто при мінливому коефіцієнті генеруючої потужності ФЕС, отримані криві залежності вихідної напруги інвертора від косинуса кута генерації з урахуванням знаку кута при різних параметрах схеми заміщення. Проведені раніше дослідження показали, що найбільший вплив на напругу точки підключення інвертора може мати відрізок з'єднувального кабелю L_2 між точкою підключення інвертора і підвищувальним трансформатором ФЕС.

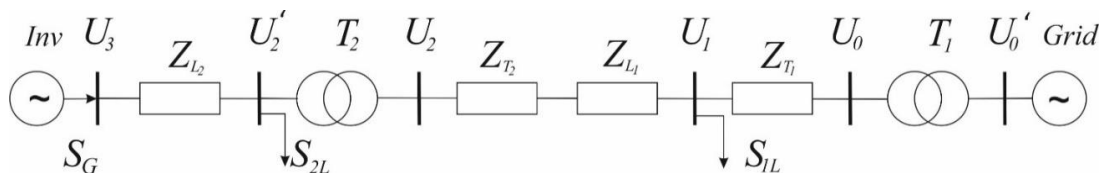


Рисунок 1 – Схема підключення ФЕС до розподільної мережі 10 кВ, яка живиться від підстанції 10/35 кВ

Генерація може розглядатися у двох квадрантах (рис. 2), тобто з різними знаками реактивної потужності. Коефіцієнт генеруючої потужності ФЕС визначається як:

$$\cos \phi = \frac{P_{inv}}{S_{inv,n}} = \frac{\sqrt{S_{inv,n}^2 - Q_{inv}^2}}{S_{inv,n}},$$

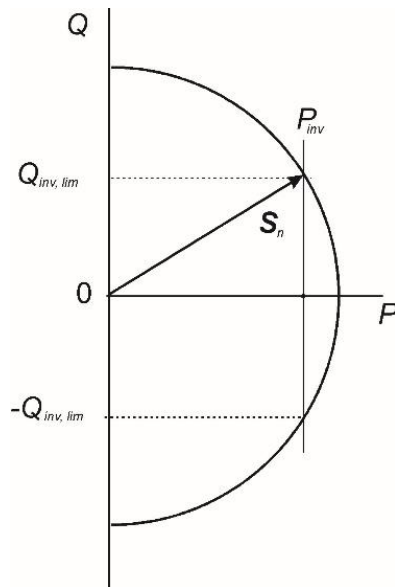


Рисунок 2 – Графічне визначення меж $\pm Q_{inv,lim}$ інверторної генерації реактивної потужності

Криві залежності вихідної напруги інвертора від косинуса кута генерації з урахуванням знаку кута показані на рис. 3 для двох ситуацій:

- вплив з'єднувального відрізка L_2 не враховується ($L_2 = 0$)
- цей відрізок врахований при обчисленнях та його довжина 200 м.

Інші параметри моделі вказані у підписи до рисунку. Графіки подані в координатах $\left(\psi, \frac{U_{inv}}{U_{inv}(Q_{inv}=0)} \right)$, де змінна ψ по осі абсцис пов'язана з коефіцієнтом потужності генерації $\cos \phi$ як

$$\psi = \begin{cases} 1 - \cos \phi, & \phi \leq 0 (\text{lagging}) \\ -1 + \cos \phi, & \phi > 0 (\text{leading}) \end{cases}$$

Права частина кривих на рис. 2 відповідає генерації індуктивної потужності ($\phi > 0$), а ліва – ємнісний ($\phi < 0$). Межі регулювання напруги складають $\pm 30^\circ$ за кутом генерації (в координатах ψ це ± 0.134).

Як бачимо, поглинання реактивної потужності на рівні 30° дозволяє понизити вихідну напругу інвертора приблизно на 2.5% відносно генерації чисто активної потужності. Таке регулювання при максимальній фотогенерації $P_{inv} = 30$ кВт можливо, якщо смарт-інвертор має запас за потужністю, а саме: номінальну потужність $S_n = P_{inv} / \cos \phi = 35$ кВА.

З графіків рисунку 3 можна отримати оцінку динамічного ефекту інверторного регулювання: при підвищенні лінійної напруги U_{inv} до 410 В інверторне регулювання з $\phi \sim 30^\circ$ дозволяє миттєво повернути напругу до допустимої межі 400 В. Зауважимо, що інверторне регулювання більш ефективне на зниженні напруги, ніж на підвищенні. При цьому ефект регулювання більш виражений, чим більше довжина з'єднувальної лінії L_2 .

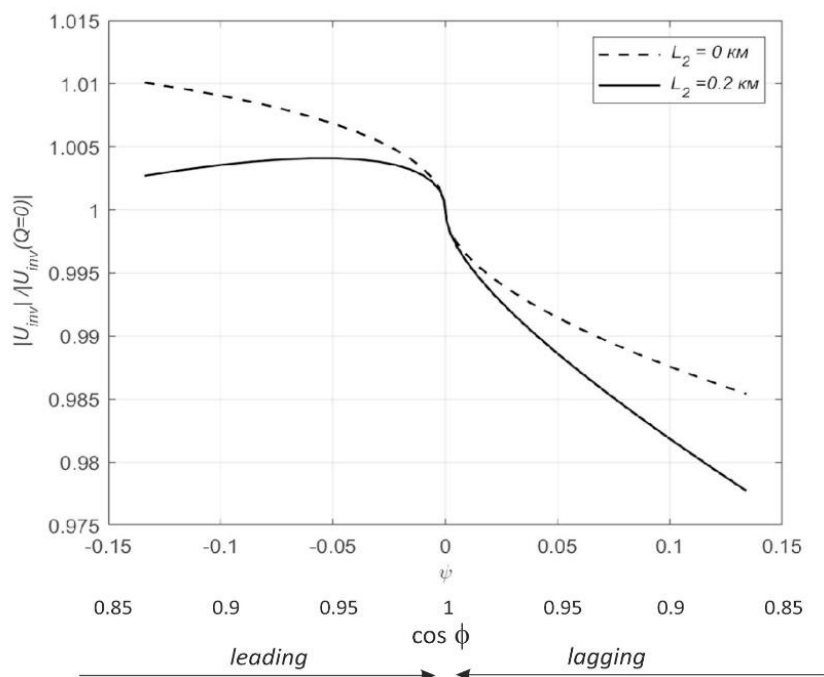


Рисунок 3 – Ступінь регулювання вихідної напруги інвертора U_{inv} (в одиницях U_{inv} при нульовій Q_{inv}) шляхом компенсації реактивної потужності для ліній L_2 (СП 4×25) при безпосередньому підключення інвертора до трансформатора T_2 і довжиною 200 м.

Інші параметри системи: номінальна потужність трансформаторів 1.6 МВА (T_1) і 63 кВА (T_2); лінія L_1 довжиною 15 км протягнута проводами АС-25; місцеві навантаження S_{1L} , S_{2L} відсутні.

Висновки. Побудована електрична модель системи “ФЕС – радіальна мережа – розподільна підстанція (ПС)”. Проаналізовано можливість підтримки напруги у точці підключення ФЕС до розподільної мережі за допомогою модуляції реактивної потужності смарт-інвертором з врахуванням ролі мережевого обладнання (трансформаторів та фідерів). Отримано оцінки ступені впливу ефекту динамічного інверторного регулювання, а також залежність цього ефекту від параметрів мережі. Показано, що інверторне регулювання більш ефективне на зниженні напруги, ніж на підвищенні, а також, що регулюючий ефект тим більше виражений, чим більша довжина з’єднувальної лінії.

Перелік посилань

1. IEC 61727:2004. Photovoltaic (PV) systems - Characteristics of the utility interface. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/publication/5736>.
2. F. Delfino, R. Procopio, M. Rossi and G. Ronda. Integration of large-size photovoltaic systems into the distribution grids: a P–Q chart approach to assess reactive support capability // IET Renew. Power Gener., 2010, Vol. 4, Iss. 4, pp. 329–340.
3. Гаевский А. Ю., Голентус И. Э. Стабилизация напряжения в сети путем компенсации реактивной мощности инверторами ФЭС // Матеріали XIV Міжнародної конференції «Відновлювана енергетика XXI століття», Крим. 16-20 вересня 2013. – с. 243-245.