

ВПЛИВ LC-ФІЛЬТРА В UPQC-V_{Amin} НА ЕФЕКТИВНІСТЬ КОМПЕНСАЦІЇ ВИЩИХ ГАРМОНІК

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено вплив параметрів LC-фільтрів послідовного та паралельного силових активних фільтрів (САФ) для системи UPQC-V_{Amin} на ефективність компенсації вищих гармонік напруги та струму в мережі 400 В / 50 Гц. За допомогою Simulink-моделі визначено залежності коефіцієнтів THD_u та THD_i від індуктивностей L_{se} та L_{sh} у діапазоні 0,5–2 мГн при фіксованих ємностях $C_{se} = 17$ мкФ та $C_{sh} = 15$ мкФ. Встановлено оптимальні діапазони значень індуктивностей, що забезпечують мінімальний рівень спотворень при дотриманні вимог ДСТУ EN 50160.

Ключові слова: UPQC, паралельний САФ, послідовний САФ, LC-фільтр, THD, якість електроенергії.

Abstract

The paper investigates the impact of LC-filter parameters of the series and shunt active power filters (APF) within the UPQC-V_{Amin} system on the efficiency of voltage and current harmonic compensation in a 400 V / 50 Hz network. Using a Simulink model, the dependencies of THD_u and THD_i coefficients on inductances L_{se} and L_{sh} were determined in the range of 0.5–2 mH with fixed capacitances $C_{se} = 17$ μ F and $C_{sh} = 15$ μ F. Optimal inductance ranges were established to ensure minimum distortion levels while complying with DSTU EN 50160 requirements

Keywords: UPQC, parallel APF, series APF, LC filter, THD, power quality.

Вступ

Пристрій UPQC (Unified Power Quality Conditioner) поєднує переваги обох підходів: послідовний силовий активний фільтр (САФ) компенсує спотворення напруги мережі, тоді як паралельний САФ забезпечує фільтрацію гармонік струму навантаження. Концепція UPQC-V_{Amin}, запропонована в роботах [1], дозволяє мінімізувати сумарне реактивне навантаження на інверторні ланки за рахунок оптимального розподілу задач між послідовним і паралельним САФ (рис. 1).

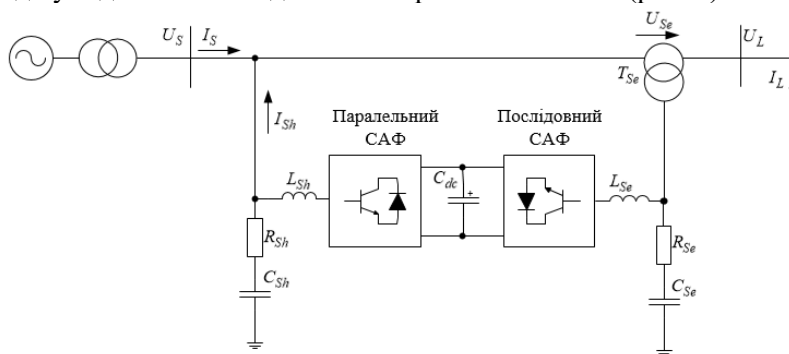


Рис. 1. Структурна схема паралельно-послідовного UPQC

Ефективність компенсації гармонік у системі UPQC значною мірою визначається параметрами вихідних LC-фільтрів кожного компенсатора. Авторами [2] показано, що неправильний вибір індуктивності послідовного САФ може призводити до підсилення гармонік на частотах, близьких до резонансної. Робота [3] досліджує оптимізацію LC-фільтра паралельного САФ з точки зору динамічної точності відтворення компенсаційного струму. Незважаючи на наявні дослідження, комплексний аналіз впливу індуктивності обох фільтрів на рівні THD_u та THD_i в системі UPQC-V_{Amin} залишається актуальним завданням, оскільки між паралельним і послідовним компенсаторами існує взаємний вплив через імпеданс мережі.

Метою роботи є визначення оптимальних діапазонів індуктивностей L_{se} та L_{sh} LC-фільтрів послідовного та паралельного САФ для системи UPQC-V_{Amin}, що забезпечують мінімальний рівень гармонічних спотворень напруги та струму у мережі 400 В / 50 Гц.

Результати дослідження

Дослідження проводились на *Simulink*-моделі *UPQC-VAmin* для трифазної мережі 400 В / 50 Гц з нелінійним навантаженням у вигляді некерованого діодного випрямляча. Для послідовного САФ індуктивність L_{se} змінювалась у діапазоні від 0,5 до 2 мГн за допомогою *Rump* функції при фіксованій ємності $C_{se} = 17$ мкФ. Для паралельного САФ аналогічним чином змінювалась індуктивність L_{sh} при $C_{sh} = 15$ мкФ. При кожному значенні параметрів після виходу системи на ustalений режим реєструвались спектри напруги та струму і розраховувались коефіцієнти THD_u та THD_i .

Резонансна частота послідовного LC-фільтра визначається виразом:

$$f_{se} = 1/2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{se} \cdot C_{se}}, f_{sh} = 1/2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{sh} \cdot C_{sh}}.$$

Розрахунок резонансної частоти LC-фільтра для послідовного САФ при $C_{se} = 17$ мкФ дає значення $f_{se} = 1726$ Гц для $L_{se} = 0,5$ мГн та $f_{se} = 863$ Гц для $L_{se} = 2$ мГн. Для паралельного САФ при $C_{sh} = 15$ мкФ дає значення $f_{sh} = 1838$ Гц для $L_{sh} = 0,5$ мГн та $f_{sh} = 918$ Гц для $L_{sh} = 2$ мГн.

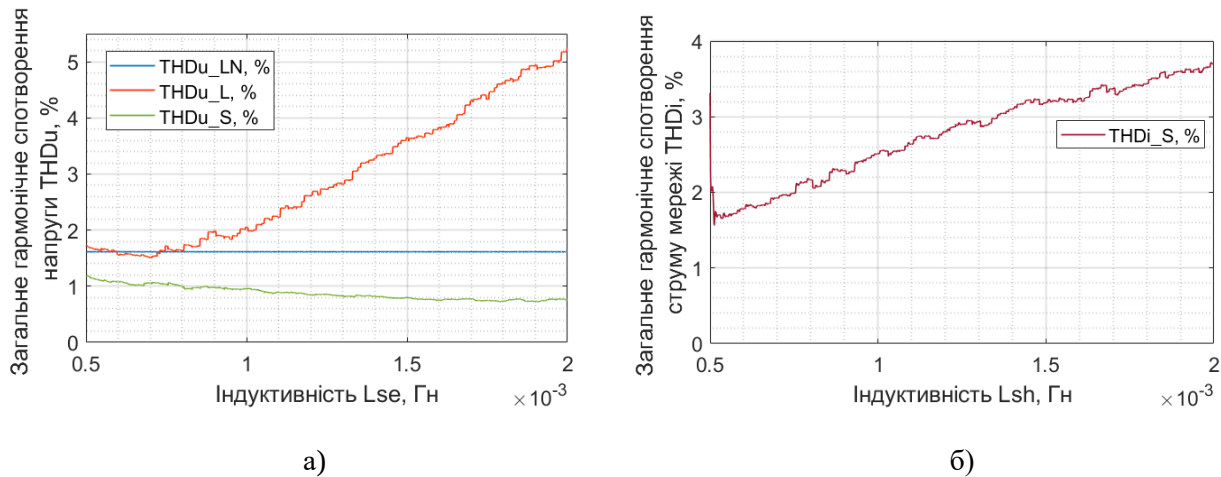


Рис. 2. Графік зміни THD_u та THD_i від індуктивності вихідних LC-фільтрів

Результати моделювання показали (рис. 2, а), що зменшення L_{se} з 2 до 1 мГн призводить до зниження THD_{u_L} напруги навантаження з 5,1 % до 2 %, що зумовлено зміщенням резонансної частоти у бік вищих гармонік (5-а та 7-а гармоніки), які є домінуючими у спектрі навантаження. За номінального значення $THD_{u_LN} = 1,6$ % без *UPQC-VAmin*. Для THD_{u_S} мережі характерний протилежний ефект, при зниженні індуктивності L_{se} до 1 мГн спостерігається зростання THD_u з 0,8 до 1 %. При подальшому зменшенні L_{se} спостерігається стабільне підтримання THD_u на рівні номінального значення для напруги навантаження та 1% для напруги мережі при значенні 0,5-0,8 мГн, що пояснюється взаємодією між резонансним контуром послідовного САФ та індуктивністю мережі на частотах вище 29-ї та 31-ї гармонік.

Для паралельного САФ (рис. 2, б) зменшення L_{sh} з 2 мГн до 0,55 мГн дозволяє монотонно знизити THD_{i_S} мережі з 3,8 % до 1,85 %, оскільки менша індуктивність вихідного фільтра підвищує смугу пропускання контуру струмового регулювання і забезпечує точніше відтворення компенсаційного струму на вищих гармоніках. Водночас при $L_{sh} = 0,5$ мГн зафіксовано зростання THD_i до 3,7 % та появу пульсацій у струмі компенсатора з частотою, близькою до частоти комутації інвертора, що свідчить про зниження запасу стійкості контуру регулювання.

За результатами моделювання встановлено, що оптимальний діапазон значень $L_{se} \in [0,5; 0,8]$ мГн забезпечує стабільний рівень $THD_{u_S} \leq 1$ % та $THD_{u_L} \leq 2$ %, а $L_{sh} \in [0,55; 0,8]$ мГн — рівень $THD_{i_S} \leq 2$ %, що відповідає вимогам стандарту ДСТУ EN 50160 щодо якості електричної енергії. Збільшення індуктивностей понад 1,5 мГн призводить до суттєвого погіршення показників компенсації внаслідок зменшення смуги пропускання фільтрів та зниження їх ефективності на 5-й та 7-й гармоніках.

Висновки

Визначено залежності коефіцієнтів THD_u та THD_i від індуктивностей LC -фільтрів послідовного САФ та паралельного САФ для системи $UPQC$ - V_{Amin} у діапазоні L_{se} , $L_{sh} = 0,5$ – 2 мГн на основі *Simulink*-моделювання.

Встановлено, що оптимальний діапазон $L_{se} \in [0,5; 0,8]$ мГн (при $C_{se} = 17$ мкФ) забезпечує мінімальний рівень THD_u для послідовного САФ, тоді як зменшення нижче $0,5$ мГн призводить до зростання спотворень внаслідок небажаної взаємодії з імпедансом мережі.

Для паралельного САФ оптимальний діапазон $L_{sh} \in [0,55; 0,8]$ (при $C_{sh} = 15$ мкФ), що компенсує $THD_i \leq 2\%$ при достатньому запасі стійкості контуру регулювання струму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Khadkikar V. A new control philosophy for a unified power quality conditioner (UPQC) to coordinate load-reactive power demand between shunt and series inverters / V. Khadkikar, A. Chandra // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2008. — Vol. 23, No. 4. — P. 2522–2534. — DOI: 10.1109/TPWRD.2008.921146.
2. Rahmani S. A combination of shunt hybrid power filter and thyristor-controlled reactor for power quality / S. Rahmani, A. Hamadi, K. Al-Haddad // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2014. — Vol. 61, No. 5. — P. 2152–2164. — DOI: 10.1109/TIE.2013.2272271.
3. Tareen W. U. K. Three-phase transformerless shunt active power filter with reduced switch count for harmonic compensation in grid-connected applications / W. U. K. Tareen, S. Mekhilef // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2018. — Vol. 33, No. 6. — P. 4868–4881.

Лебедь Денис Юрійович – PhD, асистент кафедри ЕСЕМ, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com

Lebed Denys Yuriiovich – PhD, assistant Professor of the Department of Electrical Engineering Systems of Electricity Consumption and Energy Management, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: 4e15b.lebyd@gmail.com