

ГАРМОНІЧНІ СКЛАДОВІ НАПРУГИ ТА СТРУМУ В МАГІСТРАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Розроблена математична модель автотрансформатора АОДЦТН-333000/750/330. Змодельовано електричну та магнітну системи автотрансформатора. Проведено дослідження гармонічного складу напруги та струму на імітаційній моделі мережі з однією лінією електропередавання 750 кВ. Визначено коефіцієнти викривлення THD по струму та напрузі в лінії електропередавання 750 кВ для геомагнітних струмів 50...200 А в нейтралях автотрансформаторів за активного та активно-індуктивного навантаження.

Ключові слова: автотрансформатор, математична модель, імітаційна модель мережі, вищі гармоніки, геомагнітний індукційний струм.

Вступ

Магістральні мережі надвисокої напруги 750 кВ Об'єднаної енергетичної системи України на теперішній час досить сбалансовані: вищі гармонічні складові напруги та струму знаходяться на значно нижчому рівні в порівнянні з високовольтними мережами низької та середньої напруги. Підвищення рівня вищих гармонік струму та напруги в низьковольтній мережі призводить до загострення проблеми електромагнітної сумісності елементів мережі [1], а в високовольтних мережах надвисокої напруги надмірна їх наявність може призвести до аварійних ситуацій, пов'язаних з вимиканням пристроїв компенсації реактивної потужності та лавиноподібного відключення ліній електропередавання [2, 3]. Тому проблема підвищення рівня вищих гармонік в магістральних мережах є досить актуальною.

Виходячи з аналізу нормальних робочих режимних параметрів мереж, зафіксованих інформаційно-діагностичним комплексом «Регіна» та наданих кафедрі електричних мереж та систем «Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського» МЧП «Анігер», встановлено:

– в мережі 750 кВ перша гармоніка струму знаходиться в межах 86...97 %, а нульова гармоніка складає менше 1,5 %; перша гармоніка напруги знаходиться в межах 98...98,5 % при цьому нульова гармоніка не перевищує 0,2 %; серед вищих гармонік струму та напруги переважають третя та п'ята гармоніки; нульова гармоніка струму $3I_0$ в більшості випадків перевищує 30 %, а її значення досягає 10 % від діючого значення струму в фазах;

– в мережі 330 кВ перша гармоніка струму знаходиться в межах 71...89 %, а нульова гармоніка складає менше 2,5 %; перша гармоніка напруги знаходиться в межах 98...98,5 % при цьому нульова гармоніка практично відсутня; серед вищих гармонік струму переважають друга, третя та п'ята гармоніки, а напруги — п'ята гармоніка; нульова гармоніка струму $3I_0$ в більшості випадків перевищує 20 % і її значення досягає 20 % від діючого значення струму в фазах;

– в мережі 10 кВ перша гармоніка струму знаходиться в межах 63...71 %; перша гармоніка напруги знаходиться в межах 98...99 %; з наявних практично фіксованих всіх дев'ять вищих гармонік струму переважають друга, третя, п'ята і сьома гармоніки, а напруги — п'ята гармоніка.

Основними чинниками, які можуть провокувати виникнення вищих гармонік в магістральних мережах надвисокої напруги можуть бути інверторні вставки постійного струму, які на сьогодні відсутні в енергосистемі, та геомагнітні збурення навколоземного простору, що супроводжуються квазіпостійними геомагнітними індукційними струмами (ГІС), які призводять до насичення магнітних систем автотрансформаторів та трансформаторів [3, 5]. Звичайно, не виключається і можливість часткового проникнення в магістральні мережі надвисокої напруги високочастотних гармонік з мереж нижчих класів напруги.

Збурення магнітосфери Землі потоками плазми від Сонця набувають в сучасних умовах критичного характеру, що підтверджується аварійними подіями в енергосистемах світу, особливо в краї-

нах північної півкулі вище 35 паралелі [4]. Локальні турбулентні збурення магнітного поля Землі призводять до зміни електричного поля і виникнення поверхневого потенціалу, який, діючи між заземленими нейтраліями високовольтних автотрансформаторів по кінцях протяжних ліній електропередавання, викликає протікання між ними геомагнітного індукційного струму частотою від 0,001 до 1 Гц. В порівнянні зі струмами основної частоти, ГІС по суті, є квазіпостійним і призводить до зміщення робочої точки магнітної системи автотрансформаторів, тобто до її насичення та, відповідно, до генерування в мережу вищих гармонік та підвищеного споживання автотрансформатором реактивної потужності [5].

У дослідженні режимних параметрів систем змінного струму з трансформуючими елементами в моделях трансформаторів увага приділяється гістерезису та формі кривої намагнічування, а от її несиметрія залишається поза увагою. Тобто, виходячи з сучасних реалій, імітаційна модель трансформатора повинна враховувати зміщення робочої точки магнітної системи.

Результати дослідження

Мета роботи — створення імітаційної математичної моделі автотрансформатора, яка б враховувала зміщення робочої точки магнітної системи за наявності постійної складової струму нульової гармоніки, і дослідження спектру напруг та струму, який генерує автотрансформатор в мережу.

В магістральних мережах ОЕС України на напругу 750 кВ використовуються автотрансформатори АОДЦТН-333000/750/330, тому для цього типу автотрансформатора була створена імітаційна математична модель, яка показана на рис. 1.

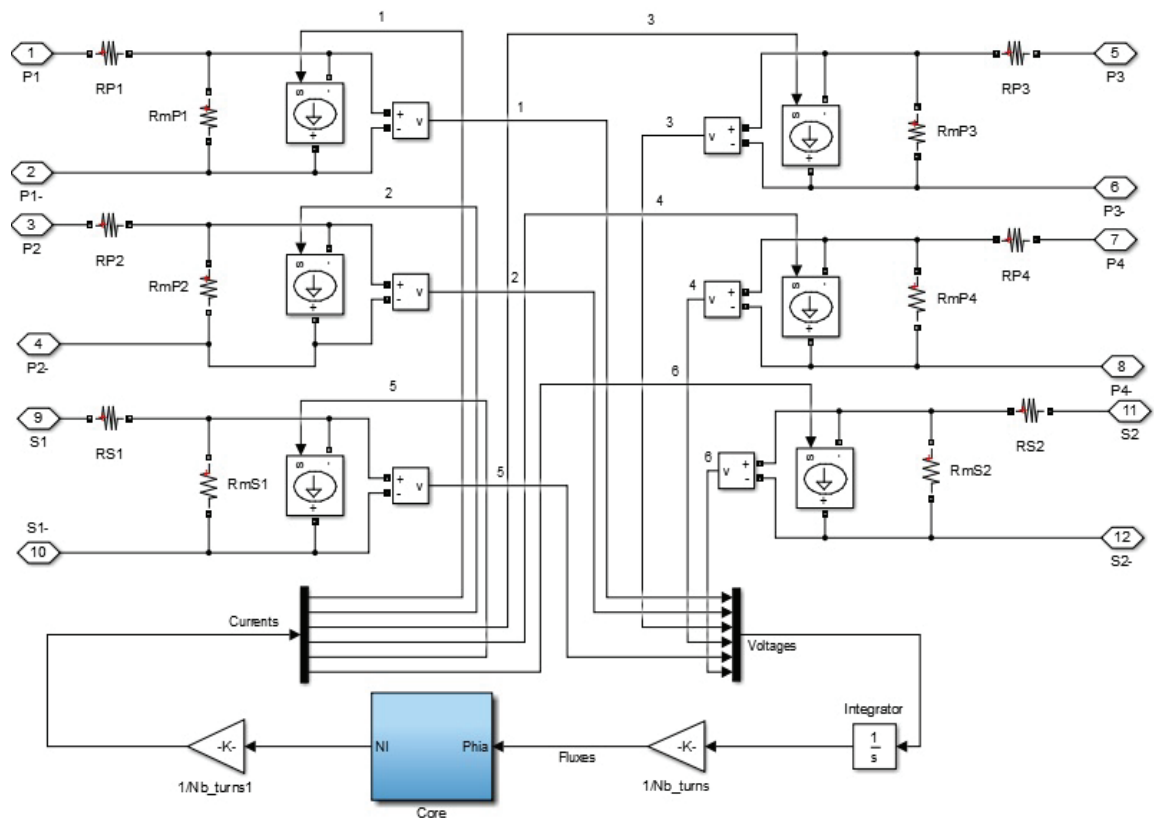


Рис. 1. Імітаційна модель автотрансформатора з електричним та магнітним колами

Дані про схему з'єднань обмоток автотрансформатора, розміри магнітної системи, поперечні перерізи стрижнів та ярем, число витків обмоток та матеріал сталі, з якої виготовляється магнітопвід, сформовано відповідно до паспорту автотрансформатора.

Для відтворення імітаційної моделі еквівалентного електричного кола автотрансформатора проводиться інтегрування по часу вхідної напруги на шести обмотках (чотирьох послідовних та двох спільних) з віднесенням результату до відповідної кількості витків кожної з обмоток для визначення магнітних потоків в кожному зі стрижнів. Магнітні потоки стрижнів формують еквівалентне магнітне коло у вигляді сигналів керованих джерел струму, відповідно, до напруженості магнітного поля з урахуванням нелінійного магнітного опору стрижнів та опору розсіювання. Враховуючи напруженість магнітного поля та відповідну кількість витків, визначаються електри-

чні сигнали, які в електричній схемі заміщення на керованих джерелах струму формують струм в обмотках автотрансформатора.

Адекватність моделі підтверджена збігом параметрів дослідів неробочого ходу та короткого замикання моделі та паспортних даних автотрансформатора АОДЦН-333000/750/330 з відносною похибкою, яка не перевищує 0,2%.

Для дослідження спектра високочастотних гармонік в мережі змінного струму, які генеруються автотрансформатором в мережу за насичення його магнітної системи квазіпостійними геомагнітними індукційними струмами, розроблено імітаційну математичну модель (рис. 2). Модель включає дві групи однофазних автотрансформаторів *Autotransformer*, сполучені лінією електропередавання 750 кВ *Line* довжиною 400 км, у разі живлення та навантаження зі сторони 330 кВ. В нейтралі трансформатора введено джерело постійної напруги і, значення постійного струму в нейтралі автотрансформатора змінювалось покроково від 5 до 200 А для активного та активно-індуктивного навантаження. Для контролю за формою кривої напруги та струму вибрано 4 точки: 1, 4 — на стороні 330 кВ; 2, 3 — по кінцях ЛЕП 750 кВ.

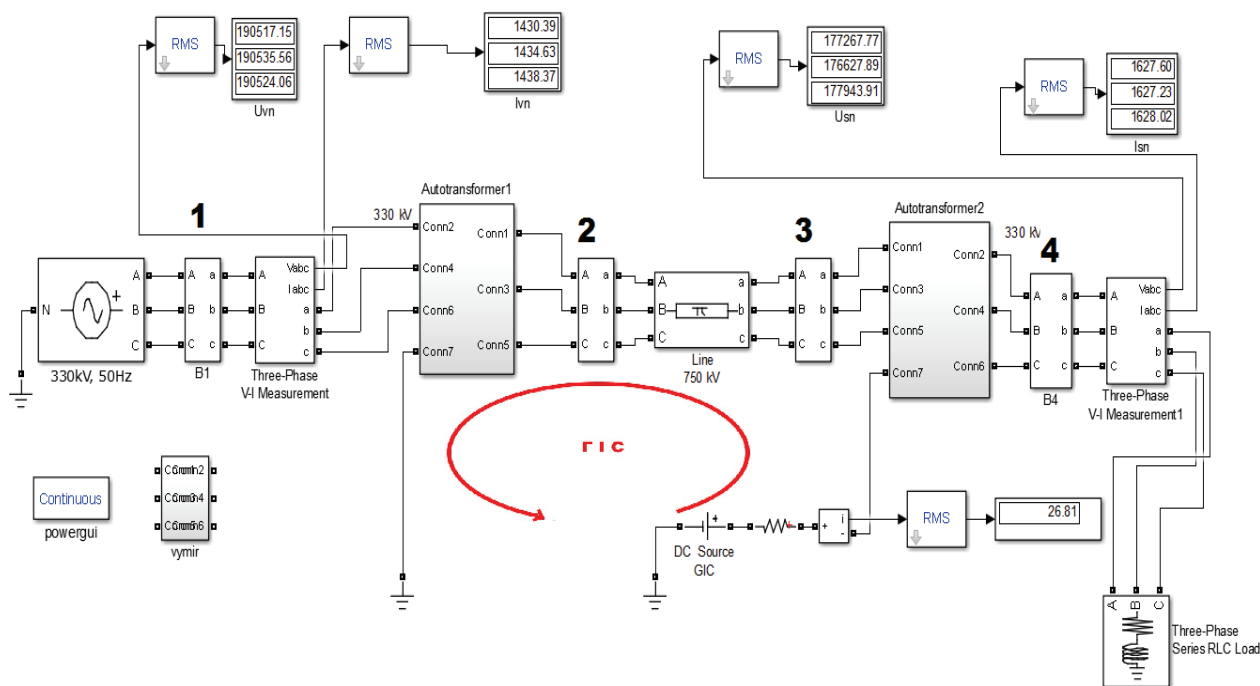


Рис. 2. Імітаційна математична модель мережі змінного струму

В табл. 1 подано спектр гармонік та коефіцієнти викривлення по струму та напрузі в лінії електропередавання 750 кВ (точка 2) для можливих геомагнітних струмів 50...200 А за активного навантаження, а в табл. 2 — за активно-індуктивного навантаження.

Таблиця 1

Коефіцієнти викривлення синусоїдальної кривої за активного навантаження в лінії електропередавання 750 кВ

ГІС, А	Параметр	THD, %	Значення коефіцієнта викривлення по гармоніках, %							
			0	2	3	4	5	6	7	8
50 А	Струм	1,97	0,26	1,39	1,06	0,73	0,40	0,08	0,07	0,15
	Напруга	0,10	0,01	0,05	0,05	0,04	0,03	0,01	0,00	0,00
100 А	Струм	4,66	2,88	4,19	1,87	0,15	0,59	0,36	0,04	0,24
	Напруга	0,18	0,07	0,14	0,08	0,01	0,03	0,00	0,00	0,04
150 А	Струм	5,77	5,46	5,72	1,15	0,88	0,65	0,14	0,43	0,02
	Напруга	0,20	0,12	0,18	0,06	0,05	0,03	0,01	0,00	0,00
200 А	Струм	6,15	8,04	5,98	0,14	1,23	0,11	0,48	0,07	0,40
	Напруга	0,16	0,07	0,03	0,09	0,06	0,05	0,04	0,02	0,05

Коефіцієнти викривлення синусоїдальної кривої за активно-індуктивного навантаження в лінії електропередавання 750 кВ

ГІС, А	Параметр	ТНД, %	Значення коефіцієнта викривлення по гармоніках, %							
			0	2	3	4	5	6	7	8
50 А	Струм	2,27	0,11	1,43	1,14	0,79	0,47	0,79	0,12	0,13
	Напруга	0,10	0,00	0,04	0,04	0,03	0,02	0,05	0,01	0,00
100 А	Струм	5,30	3,09	4,44	1,98	0,12	0,65	1,84	0,08	0,34
	Напруга	0,21	0,06	0,12	0,07	0,00	0,04	0,12	0,01	0,03
150 А	Струм	6,08	5,92	5,72	1,09	0,98	0,66	0,87	0,49	0,03
	Напруга	0,22	0,12	0,16	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,01
200 А	Струм	6,62	8,57	6,04	0,03	1,25	0,06	2,25	0,04	0,50
	Напруга	0,25	0,07	0,03	0,08	0,06	0,05	0,17	0,01	0,07

На рис. 3 графічно показано характерні залежності зміни коефіцієнта викривлення синусоїдальної кривої (ТНД) струму та напруги для геомагнітного струму в нейтралях автотрансформаторів від 50 до 200 А.

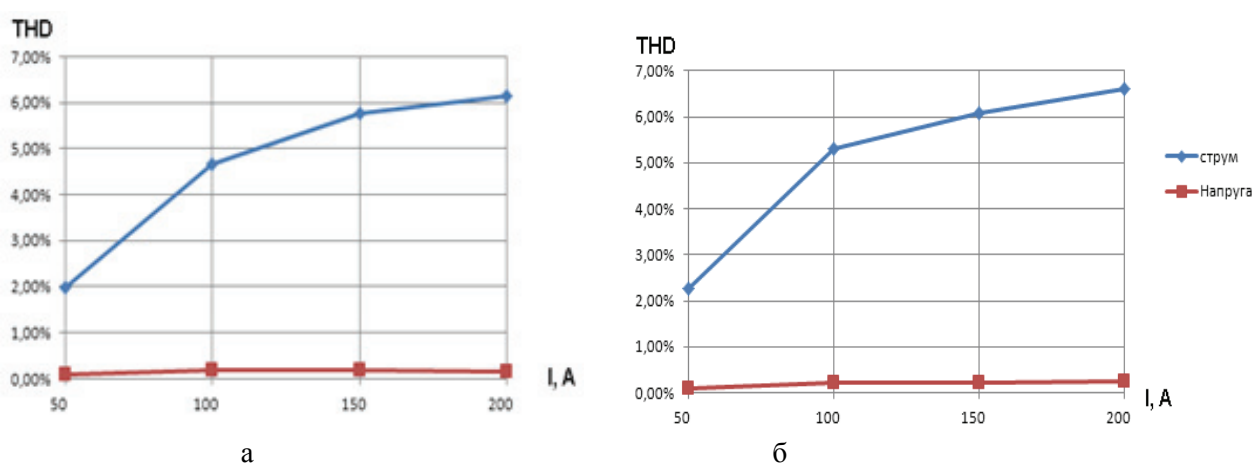


Рис. 3. Графіки зміни коефіцієнта викривлення синусоїдальної кривої ТНД струму та напруги: а — за активному навантаження; б — за активно-індуктивного навантаження

Висновки

Встановлено, що геомагнітні індукційні струми величиною до 50 А в нейтралях автотрансформаторів магістральних ліній електропередавання 750 кВ не приводять до суттєвого зміщення робочої точки магнітної системи автотрансформатора і збільшення коефіцієнта викривлення синусоїдальної кривої струму в фазах. Збільшення квазіпостійного струму ГІС в нейтралях вище 50 А призводить до суттєвого збільшення як спектра гармонік, так і коефіцієнта викривлення синусоїдальної кривої струму.

На основі дослідження математичної моделі автотрансформатора АОДЦТН-333000/750/330 можна стверджувати, що розроблену модель можна використовувати під час створення та дослідження імітаційних моделей магістральних мереж змінного струму для оцінки гармонічного складу напруги і струму та виявлення їх впливу на режимні параметри мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шидловский А. К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А. К. Шидловский, А. Ф. Жаркин. — К. : Нац. акад. наук Украины, Ин-т электродинамики. — 2005. — 211 с. — (Проект «Наукова книга»).
2. Кириленко А. В. Геомагнитные индукционные токи в электрических сетях / А. В. Кириленко, В. В. Кирик, А. Д. Подольцев // Энергетика та електрифікація. — 2012. — № 11. — С. 46—49.
3. Boteler D. H. Geomagnetic effects on the pipe-to-soil potentials of a continental pipeline / D. H. Boteler // Advances in Space Research - ADV SPACE RES, 26. — 2000. — С. 15—20.
4. IEEE/PES technical report on Geomagnetic Disturbance and its impacts on the Power Grids // IEEE Power & energy so-

ciety technical council Geomagnetic Disturbance task Force, Piscataway. — nJ. — may 2013.

5. Price P. R. Geomagnetically Induced Current Effects on Transformers / P. R. Price // Power Delivery, IEEE Transactions on. — 2002. — Vol. 17, Issue 4. — P. 1002—1008.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 1.12.2017

Кирик Валерій Валентинович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електричних мереж та систем, e-mail: vkyryk@ukr.net .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

V. V. Kyryk¹

Voltage and Current Harmonic Components in Transmission Networks

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

The mathematical model of AODCTN-333000/750/330 autotransformer has been presented in the paper. Electric and magnetic systems of autotransformer are simulated. There has been conducted the research of harmonic composition of voltage and current on the simulation model of network with one 750 kV transmission power line. Total harmonic distortion (THD) of current and voltage in one 750 kV transmission line for geomagnetic currents 50...200 A in neutral conductors of autotransformers have been determined at active and active-inductive load.

Keywords: autotransformer, mathematical model, simulation model of network, THD, GIC.

Kyryk Valerii V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electric Networks and Systems, e-mail: vkyryk@ukr.net

B. B. Kyryk¹

Гармонические составляющие напряжения и тока в магистральных сетях

¹Национальный Технический Университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Разработана математическая модель автотрансформатора АОДЦТН-333000/750/330. Смоделированы электрическая и магнитная системы автотрансформатора. Проведено исследование гармонического состава напряжения и тока на имитационной модели сети с одной линией электропередачи 750 кВ. Определены коэффициенты искажения THD по току и напряжению в линии электропередачи 750 кВ для геомагнитных токов 50...200 А в нейтральных автотрансформаторов при активной и активно-индуктивной нагрузке.

Ключевые слова: автотрансформатор, математическая модель, имитационная модель сети, высшие гармоники, геомагнитный индукционный ток.

Кирик Валерий Валентинович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрических сетей и систем, e-mail: vkyryk@ukr.net