

УДК 621.314

С.В.Казанський¹, канд.техн.наук, П.П.Пекур², канд.техн.наук (Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", Київ)

Особливості оцінювання навантажувальної здатності силових трансформаторів на вітроелектричних станціях

Показано необхідність дослідження особливостей зміни теплового стану і навантажувальної здатності силових трансформаторів на вітроелектричних станціях. Розроблено термодинамічну 3D-модель силового оливного трансформатора та проаналізовано результати моделювання. Бібл. 7, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: вітроелектрична станція, силовий трансформатор, навантажувальна здатність, визначення теплового стану.

Orcid: ¹0000-0002-6113-2600; ²0000-0002-7196-0290

Вступ. Постановою Кабінету Міністрів України від 1 березня 2010 р. №243 (зі змінами, затвердженими Постановою Кабінету Міністрів України від 11 листопада 2015 р. №929) затверджено Державну цільову економічну програму енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та альтернативних видів палива на 2010-2016 рр. [1].

Останнє десятиріччя в Україні будівництво вітроелектростанцій (ВЕС) та сонячних електростанцій (СЕС) ведеться досить динамічно. Так, якщо в 2009 р. встановлена потужність електростанцій на ВДЕ становила 84 МВт, або 0,15% від загальної встановленої потужності ОЕС України, то на кінець 2011 р. сумарна встановлена потужність ВЕС та СЕС зросла до 308,8 МВт і становила 0,58% від загальної встановленої потужності ОЕС України [2].

За даними ДП НЕК "Укренерго" [3] станом на початок 2013 р. видано та погоджено технічні умови на приєднання потужності ВЕС обсягом 2062 МВт, а загальна потужність ВЕС, які можуть з'явитись в Україні орієнтовно до 2017 року (з урахуванням Криму), становить більше 4000 МВт. Всього отримано заявок на видачу технічних умов на приєднання потужності ВЕС та СЕС близько 14000 МВт. Це відповідає сучасному рівню розвитку вітроенергетики в таких країнах, як Італія і Франція та дасть можливість Україні долучитися до десятки провідних країн

світу за встановленою потужністю електростанцій на ВДЕ.

Забезпечення надійної роботи обладнання електричних мереж України є нагальним стратегічним завданням [4]. При цьому європейський досвід експлуатації електростанцій на ВДЕ свідчить, що в енергосистемах таких країн, як Данія, Німеччина, Іспанія та ін., де впроваджуються значні обсяги потужностей електростанцій на ВДЕ, ринкові механізми стали переважати над надійністю роботи енергооб'єднання Європи в цілому. Системна аварія в УСТЕ у 2006 р. була частково спровокована наявністю значних перетоків потужності з енергорайонів, у яких працювали електростанції на ВДЕ. Крім того, зазначені явища істотно впливають на роботу силових трансформаторів підстанцій, на яких здійснюється приєднання ВДЕ до об'єднаної електричної мережі.

В даній роботі досліджуються особливості експлуатації силових трансформаторів, до яких приєднуються ВЕС.

Визначення характеристик потужності агрегатів ВЕС. Робота вітроагрегатів ВЕС являє собою неперервний електромеханічний перехідний процес, обумовлений змінами величини швидкості вітру та його напрямку. Миттєві значення швидкості вітру визначають аеродинамічні сили та їх моменти, що діють на ротор вітроагрегатів, а ті, в свою чергу, визначають швидкість обертання, струм та потужність

вітрогенератора. Непередбачуваність змін величини та напрямку вітру, що діє на вітроагрегати ВЕС, поєднується зі значним діапазоном змін швидкостей вітру (рис. 1). При цьому потужність вітру пропорційна кубу його швидкості, тобто, якщо швидкість вітру змінюється в два рази, то

потужність змінюється у 8 разів. Тому вже на стадії проектування ВЕС мають бути розроблені технічні рішення, що забезпечують високу надійність та ефективність роботи як агрегатів самої ВЕС, так і обладнання підстанцій, до яких приєднуються ВЕС.

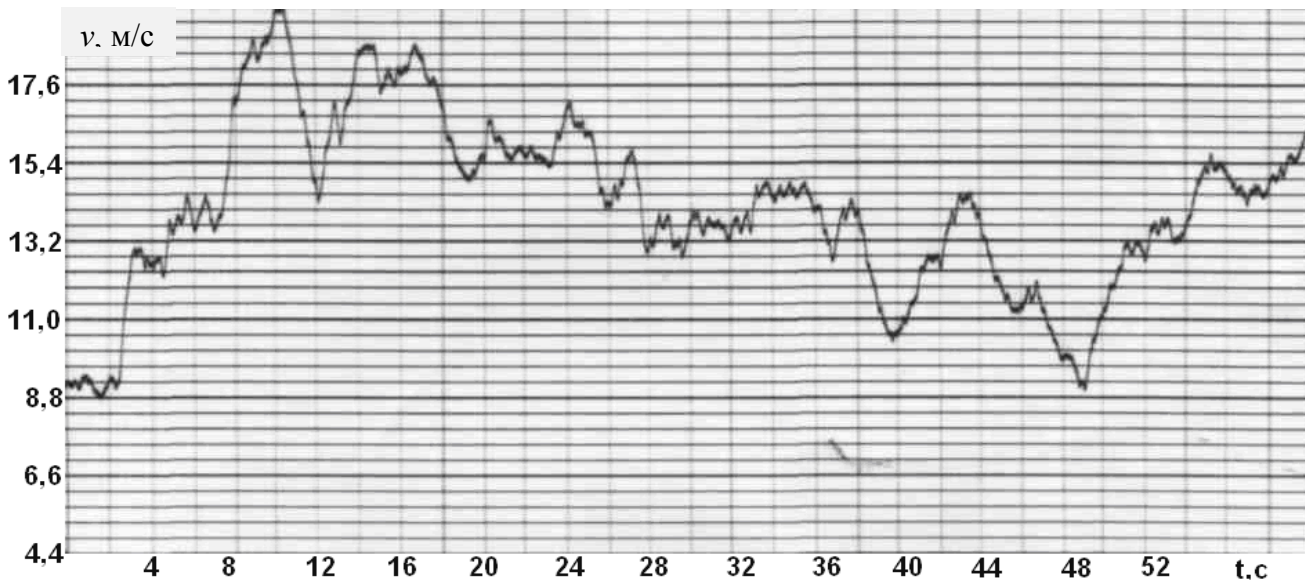


Рис. 1. Фрагмент експериментальної осцилограми змін швидкості вітру.

В роботі [5] викладено методику визначення імовірнісних характеристик потужності вітроагрегатів ВЕС. Якщо знехтувати незначними змінами кутової швидкості обертання ω_p ротора вітроагрегату і вважати, що зміни потужності генератора P_z обумовлені лише змінами моменту ротора ($\omega_p = \text{const}$), то величина генерованої потужності вітроагрегату визначається рівнянням:

$$P_z(t | \omega_{pn}) = M_z(t | \omega_{pn}) \cdot \omega_{pn} = \frac{\omega_{pn}}{1 + a_n} \times \\ \times \left\{ 0,5\pi\rho R^3 v(t)^2 \bar{M}_p[z(t) | \varphi_l] - M_{cn} \right\},$$

де ω_{pn} – номінальна кутова швидкість обертання ротора, с^{-1} ; ρ – питома густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; R –

радіус ротора, м; $v(t)$ – поточне значення швидкості вітру, $\text{м}/\text{с}$; $\bar{M}_p[z(t) | \varphi_l]$ – відносна аеродинамічна характеристика обертального моменту ротора за фіксованого значення кута повороту лопатей; $z(t)$ – поточне значення швидкохідності ротора, в.о.; φ_l – кут повороту лопатей ротора відносно площини обертання, град.; a_n – коефіцієнт, що враховує збільшення моменту опору від втрат, обумовлених навантаженням вітроагрегату, в.о.; M_{cn} – момент сил опору в трансмісії та генераторі на холостому ході, Н·м.

Як приклад, на рис. 2 наведено залежність P_z від швидкості вітру за сталого значення ω_{pn} і фіксованих значень φ_l .

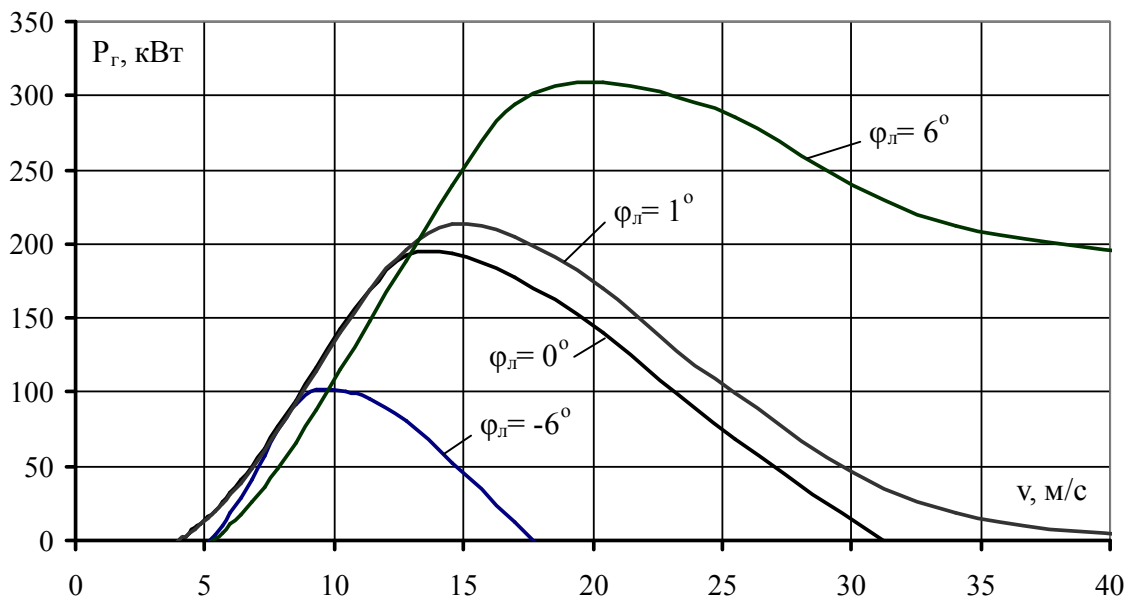


Рис. 2. Енергетичні характеристики вітроагрегату.

Таким чином, з урахуванням змін швидкості вітру, наведених на рис. 1 (від 8,8 до 19,7 м/с), потужність вітроагрегату залежно від кута повороту лопатей протягом 8 с змінювалась у межах від 100 до 310 кВт.

Саме тому постає актуальне питання: дослідити особливості експлуатації силових трансформаторів, до яких приєднуються ВЕС, з огляду на специфічні умови роботи трансформаторів зі швидкозмінним навантаженням.

Математичне визначення теплового стану силових оливних трансформаторів. За результатами багатьох теоретичних та натурних досліджень встановлено, що найінформативнішим критерієм допустимості перевантаження силових оливних трансформаторів є температура найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток (ТНТО), яка позначається як Θ_h . Саме на цьому критерії ґрунтуються наведені в [6] норми допустимого перевантаження силових оливних трансформаторів загального призначення, а також рекомендації МЕК щодо допустимого перевантаження трансформаторів [7].

Для визначення допустимого перевантаження трансформаторів за критерієм ТНТО використовують математичну модель розрахунку ТНТО з урахуванням фактичного струмового навантаження, температури оливи, а також характеристик системи охолодження [6]. При цьому, на-

приклад, для трансформаторів із системою охолодження ОН (примусова циркуляція охолоджуючого повітря) максимальне значення температури найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток визначається так:

$$\Theta_h = \Theta_a + \Delta\Theta_{br} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right] + H_{qr} K^y,$$

де Θ_a – температура навколишнього середовища, °С; $\Delta\Theta_{br}$ – перевищення температури оливи у нижній частині бака, обмотки чи охолоджувача над температурою навколишнього середовища; R – відношення навантажувальних втрат потужності за номінального струму до втрат холостого ходу; H_{qr} – градієнт температури найбільш нагрітої точки (олива на виході з обмотки), °С; K – коефіцієнт навантаження; y – коефіцієнт, значення якого визначається типом охолоджувальної системи.

Для більш потужних оливних трансформаторів із системою охолодження ОФ (примусова циркуляція охолоджуючого повітря та оливи) максимальне значення температури найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток визначається як

$$\Theta_h = \Theta_a + \Delta\Theta_{br} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right] + 2[\Delta\Theta_{imr} - \Delta\Theta_{br}] K^y + H_{qr} K^y,$$

де $\Delta\Theta_{imr}$ – перевищення середньої температури оливи над температурою навколишнього середовища.

Відносна швидкість теплового старіння ізоляції обмоток V силових оливних трансформаторів визначається за співвідношенням:

$$V = \frac{\text{швидкість старіння при } \Theta_h}{\text{швидкість старіння при } 98^\circ\text{C}} = 2^{\frac{(\Theta_h - 98)}{6}}$$

Розрахункові значення відносної швидкості теплового старіння ізоляції обмоток силових оливних трансформаторів наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Розрахункові значення відносної швидкості теплового старіння ізоляції обмоток силових оливних трансформаторів

$\Theta_h, ^\circ\text{C}$	86	92	98	104	110	116	122	128	134	140
$V, \text{в.о.}$	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	32,0	64,0	128,0

Значення ТНТО, як і відносна швидкість теплового старіння ізоляції обмоток V , є *розрахунковими* величинами, тобто такими, які не можна отримати засобами вимірювання. При цьому місце, у якому має визначитися ТНТО, залежить від багатьох факторів і взагалі може переміщуватися у внутрішньому просторі бака трансформатора. Таким чином, просторове 3D-моделювання – чи не єдиний метод визначення ТНТО, а отже – і теплового старіння ізоляції.

Результати моделювання. Моделювання проводилося на прикладі силового оливного трансформатора з системою охолодження ONAF

із застосуванням програмного пакету *SolidWorks*, який дозволяє із застосуванням вбудованої бібліотеки створювати необхідний конструктивний елемент (наприклад, силовий трансформатор), заповнювати його внутрішній простір відповідними елементами (бак із трансформаторною оливою, магнітопровід з обмотками) і рідиною (трансформаторна олива) та досліджувати зміни температури оливи та ізоляції обмоток за різних навантажувальних режимів.

Загальний вигляд елементів об'єкта моделювання наведено на рис. 3.

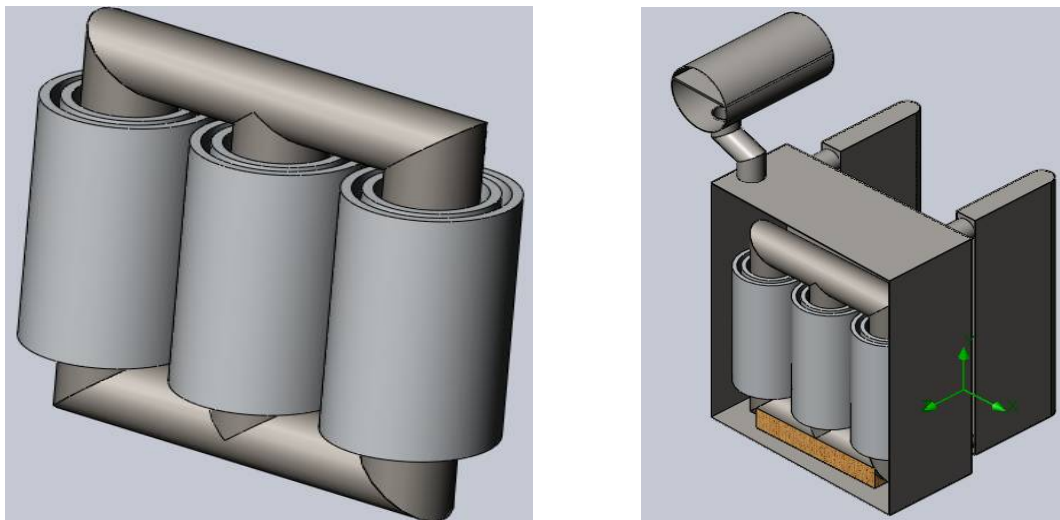


Рис. 3. Модель магнітопроводу з обмотками та елементами системи охолодження.

Моделювалися зміни теплового стану трансформатора за таких експлуатаційних умов: коефіцієнт навантаження K змінювався від 0,5 до 2,0, що відповідає діапазону робочих швидкостей вітру вітроагрегатів від 4 до 17 м/с; температура

навколишнього середовища Θ_a змінювалася від 0 до $+40^\circ\text{C}$.

Нижче, як приклад, наведено результати моделювання за температури навколишнього середовища $+20^\circ\text{C}$, номінального навантаження ($K=1$)

та при ввімкненій системі охолодження трансформатора. Зокрема, на рис. 4 показано розподіл температури на поверхні магнітопроводу та обмоток вищої напруги, а на рис. 5 – на перерізах бака трансформатора. На рис. 6 наведено розподіл швидкості циркуляції оливи всередині

бака трансформатора навколо обмоток та елементів системи охолодження, а на рис. 7 – просторове переміщення точки ТНТО на поверхні ізоляції обмоток трансформатора за результатами моделювання різних експлуатаційних умов.

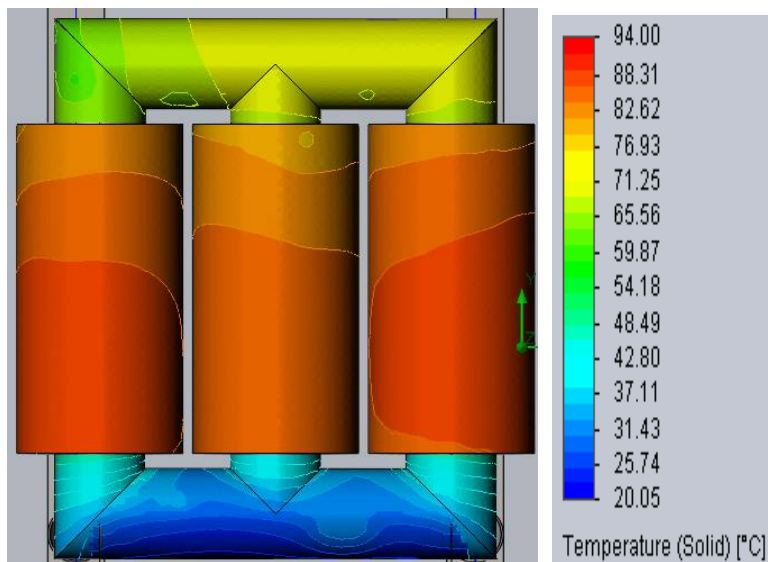


Рис. 4. Розподіл температури на поверхні магнітопроводу та обмоток ВН.

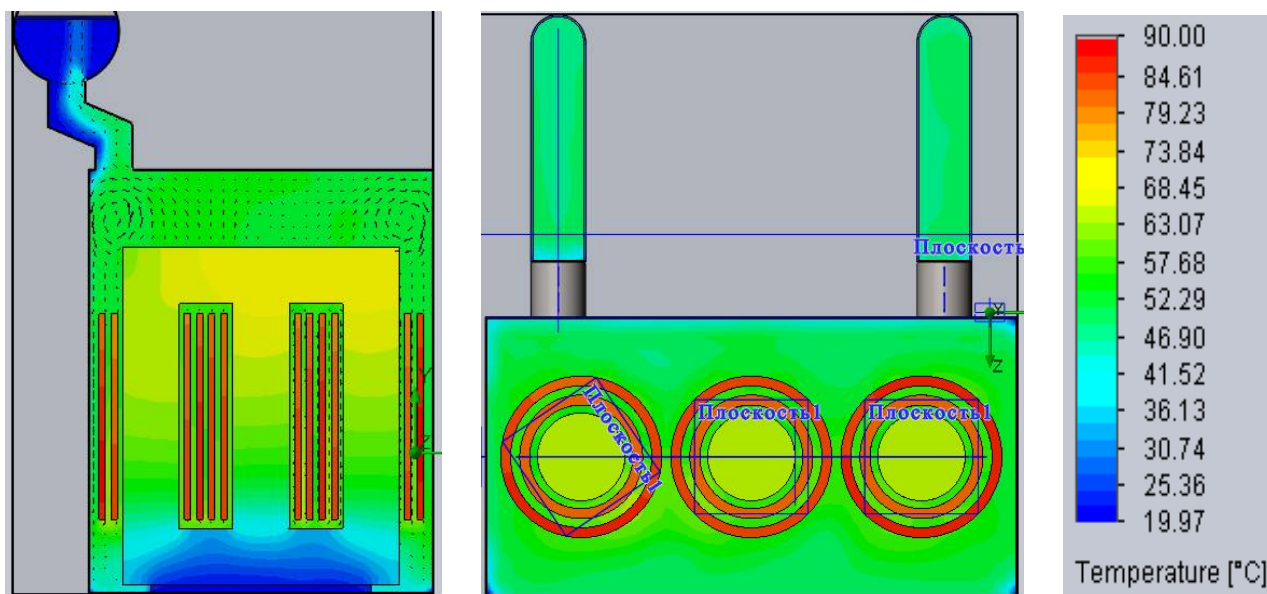


Рис. 5. Розподіл температури в перерізах бака трансформатора.

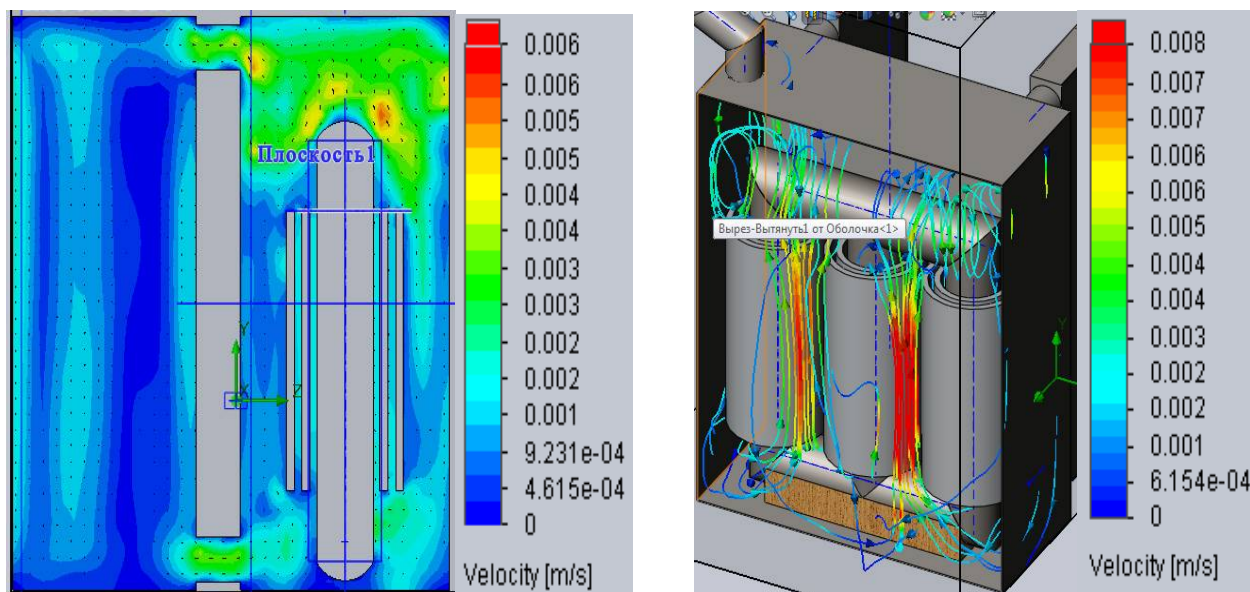


Рис. 6. Розподіл швидкості циркуляції оливи всередині бака трансформатора.

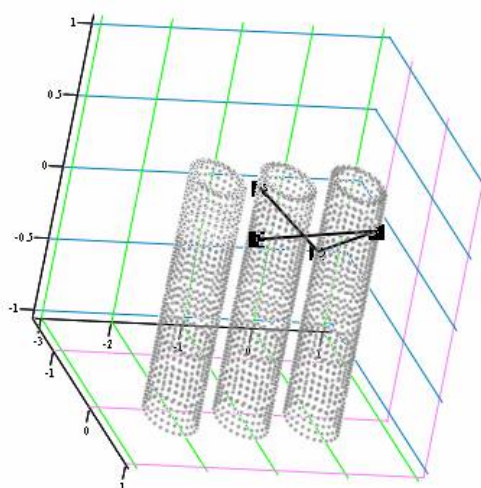


Рис. 7. Просторове переміщення найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток.

В результаті виконаного моделювання встановлено, що швидка зміна коефіцієнта навантаження K силового трансформатора на малому інтервалі часу (в разі зміни потужності вітроагрегатів ВЕС) призводить до швидкої зміни температури найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток трансформаторів підстанції, до якої приєднана ВЕС. Крім того, залежно від умов експлуатації та інтенсивності роботи охолоджувальної системи трансформатора просторове положення ТНТО може переміщуватися

всередині бака, що унеможливає безпосередню фіксацію значення ТНТО.

Висновки. Аналіз теплового стану та перевантажувальної здатності силових оливних трансформаторів може бути здійснено шляхом термодинамічного 3D-моделювання із застосуванням програмного пакету *SolidWorks*. Результати моделювання свідчать про ефективність визначення теплового стану та перевантажувальної здатності силових оливних трансформаторів підстанцій, до яких приєднуються ВЕС.

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 1 березня 2010 р. № 243 (із змінами, затвердженими Постановою Кабінету Міністрів України від 11 листопада 2015 р. № 929) "Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлювальних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2016 роки".

2. Зайченко В.Б., Олефір Д.О., Тихенко В.І. Забезпечення надійної роботи ОЕС України за умов істотного збільшення частки генерації ВЕС та СЕС // Електропанорама. – 2012. – № 12. – С. 40–44.

3. Луцик О.В. Приєднання вітрових електростанцій до магістральних електричних мереж ОЕС України // Електропанорама. – 2010. – № 6. – С. 50–53.

4. Казанський С.В. Надійність електроенергетичних систем: навчальний посібник [Текст] / С.В. Казанський, Ю.П. Матєєнко, Б.М. Сердюк. – К.: НТУУ "КПІ", 2011. – 216 с. – ISBN 978-966-622-453-1.

5. Пекур П.П. Імовірнісні характеристики потужності вітроелектричної установки / П.П. Пекур // Відновлювана енергетика. – 2014. – № 2. – С. 65–71.

6. МГОСТ 14209-97 (МЭК 354-91). Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. Дата введения 2002.01.01.

7. IEC 60076-7:2005 Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers. Released: 2005–12–15.

REFERENCES

1. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine by 2010-03-01, № 243 "On approval of the State program of energy production and the development of the sphere of production energy from renewable energy sources and alternative fuels for 2010-2016".

2. V. Zaichenko, D. Olefir, V. Tikhenko Ensure reliable operation of the united energy system of Ukraine, provided a substantial increase of the WPP and SPP generation // Electropanorama. – 2012, № 12. – P. 40–44. (Ukr)

3. O. Lushchuk Connecting WPP's to the main power grids of the united energy system of Ukraine // Electropanorama. – 2010, № 6. – P. 50–53. (Ukr)

4. Kazansky S. Reliability of power systems: training aid [Text]/S. Kazansky, Y. Mateyenko, B. Serdyuk. – K.: NTUU "KPI", 2011. – P.216 – ISBN 978-966-622-453-1.

5. Pekur P. Stochastic parameters of a wind turbine // Vidnovliuvana enerhetyka. – 2014, № 2. – P.65–71. (Ukr)

6. MGOST 14209-97 (IEC 354) Manual load power oil transformers. Date of introduction 2002.01.01. (Rus)

7. IEC 60076-7: 2005 Power transformers - Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers. Released: 2005-12-15.

С.В.Казанский, канд.техн.наук, **П.П.Пекур**, канд.техн.наук (Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского", Киев)

Особенности оценивания нагрузочной способности силовых трансформаторов на ветроэлектрических станциях

Показана необходимость исследования особенностей изменения теплового состояния и нагрузочной способности силовых трансформаторов на ветроэлектрических станциях. Разработана термодинамическая 3D-модель силового маслонаполненного трансформатора и проанализированы результаты моделирования. Библ. 7, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: ветроэлектрическая станция, силовой трансформатор, нагрузочная способность, определение теплового состояния.

Kazanskiy S., Pekur P. (National Technical University of Ukraine "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv)

Features load capacity assessment of power transformers in the wind power plants

It was shown the necessity studies of change of the thermal state and load capacity of the power transformers in the wind power plants. The thermodynamic 3D-model of the power of oil-filled transformers was developed and analyze the simulation results. References 7, table 1, figures 7.

Keywords: wind power station, power transformers, load capacity, determining the thermal state

SYNOPSIS

The dynamic increase of number and installed capacity of wind power plants (WPP) in Ukraine is based on implementation of state policy which is fostering renewable energy sector. Also, considerable increase of WPP's total capacity leads to necessity of additional survey on WPP interconnection to electrical networks of Ukrainian United Power System.

Wind current influence on power generated by WPP units was analyzed. Also it was shown that for assuring of network reliable operation with WPP units it is required to perform additional survey on heat mode operation of power transformers at substations to which shall be connected WPP.

The main parameters characterizing the heat condition of power oil transformers are temperature of the most heated point of winding insulation, as well as heat ageing of winding insulation.

The article shows thermal and dynamical 3D-model of power oil transformer and analysis of model results.

It was mentioned that model represents peculiarities of heat condition change in power oil transformer if loading changes. The model allows to fix the temperature of the most heated point of winding insulation and heat ageing of transformer insulation at different WPP operation modes.

Стаття надійшла до редакції 17.12.16
Остаточна версія 03.03.17