

Г. О. ШЕЇНА (канд. техн. наук)
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
ganna.sheina@donntu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЇЇ УПРАВЛІННЯ

Розглянуто схему електричної мережі, яка включає генератор, трансформатори, що знижують та підвищують напругу, лінію електропередачі, до якої включений пристрій поздовжньої компенсації, комплексне еквівалентне навантаження, до якого входить асинхронний двигун, пристрій поперечної компенсації. Проведено математичне моделювання. Розглянута робота схеми як в режимі максимального навантаження, так і в перехідному режимі. Проаналізовано алгоритм оцінки роботи електричної мережі з позиції як мінімізації втрат потужності тобто енергозбереження, так і з позиції стійкості роботи електричної мережі. Показана ефективність залучення існуючих технічних заходів до оптимізації розподілу потоків потужностей і забезпечення оптимальних режимів.

Ключові слова: *схема електричної мережі, генератор, трансформатор, лінія електропередачі, поздовжня компенсація, поперечна компенсація, перехідний режим, стійкість роботи мережі.*

Постановка проблеми. Всі елементи електричної системи функціонально пов'язані єдністю генерування, передачі і споживання електричної енергії – електричні станції і споживачі поєднанні мережами в електроенергетичну систему. Головна вимога до електричних систем – здатність надійно забезпечувати споживача електричною енергією постійної якості у нормальному режимі. В реальних електричних системах нормальний режим абсолютно незмінним існувати не може. Причини змін режимів різні – зміна потужностей і складу навантаження (малі зміни); зміна потужностей генерації і конфігурації системи (великі зміни, такі як включення і відключення генераторів, ліній електропередач, трансформаторів, потужних підстанцій, вузлів навантаження, тощо).

Перехід від одного режиму до іншого під час нормальної роботи електричної системи – це нормальний перехідний режим реальних електричних систем. Він вимагає надійної роботи пристроїв релейного захисту, робота яких ґрунтується на докладному відображенні процесів, що можуть відбуватися в системі.

Тому необхідно мати точні математичні моделі елементів системи. Детальне відображення процесів в них найчастіше базується на диференційних рівняннях. Їх спрощення приводить до похибки моделювання. Навпаки, детальні моделі ускладнюють дослідження режимів роботи реальних електричних систем.

Аварійні перехідні режими в електричній системі виникають внаслідок або порушення режиму системи (перевантаження окремих елементів, їх автоматичне відключення, розділ системи на частини), або виходу з робочого стану обладнання системи (генераторів, трансформаторів, ліній електропередач та інше). В сучасній енергетиці України зношення основного електрообладнання енергосистем досягає високого рівня і з кожним роком його відсоток росте.

Отже актуальним є питання уточнення математичних моделей елементів мережі і алгоритмів аналізу аварійних режимів. Це дозволить підвищити точність управління процесом експлуатації електричних систем (визначення часу спрацювання реле, часу дії пристроїв протиаварійної автоматики, швидкості дії регулюючих пристроїв, швидкості підйому збудження генераторів і інше).

Мета. Розвиток енергетики України передбачає не лише будівництво нових об'єктів енергосистеми, але й раціональне управління існуючими мережами з використанням вдосконалених технічних заходів. Існуючі технічні заходи необхідно залучати до оптимізації поточного розподілу потужностей і забезпечення оптимальних режимів. Тому необхідно розвивати моделі елементів електричної мережі для автоматизації її управління.

Задачі, що підлягають вирішенню: дослідження схеми мережі за допомогою математичного моделювання, аналіз алгоритму оцінки роботи електричної мережі з позиції як мінімізація втрат потужності, так і з позиції стійкості роботи електричної мережі.

Викладення основного матеріалу дослідження. В електричній системі перехідні процеси виникають кожен раз, коли порушується баланс електричних і механічних сил. Важливо мати уявлення про те, як будуть поводитися електричні машини: як будуть змінюватися механічні та електромагнітні моменти, що діють на валах машин.

Для аналітичного вивчення перехідних процесів складається математична модель електричної системи. Складність полягає в тому, щоб скласти таку математичну модель, яка б точно відображала всі властивості реального об'єкта. І головна складність в машинах, що обертаються.

На практиці застосовують різні моделі генераторів в залежності від мети проведення розрахунків.

Система рівнянь, що достовірно і повно описує фізичні явища в синхронних генераторах – система рівнянь Парка-Горева [1], записана в осях d і q , які синхронно обертаються. Вона має наступний вид:

$$\begin{cases} u_d = R \cdot i_d + p\Psi_d - \omega\Psi_q \\ u_f = p\Psi_{fd} + R_{fd} \cdot i_{fd} \\ 0 = p\Psi_{1D} + R_{1D} \cdot i_{1D} \\ \dots \\ 0 = p\Psi_{nD} + R_{nD} \cdot i_{nD} \\ u_q = R \cdot i_q + p\Psi_q + \omega\Psi_d \\ 0 = p\Psi_{1Q} + R_{1Q} \cdot i_{1Q} \\ \dots \\ 0 = p\Psi_{mQ} + R_{mQ} \cdot i_{mQ} \end{cases} \quad (1)$$

де $\Psi_d, \Psi_{fd}, \Psi_{1D}$ – потокозчеплення по поздовжній осі симетрії ротора d для обмотки статора, обмотки збудження і i -того демпферного контуру, Ψ_q, Ψ_{jQ} – потокозчеплення по поперечній осі симетрії ротора q для обмотки статора і j -того демпферного контуру.

Для опису математичної моделі синхронних генераторів використовуються еквівалентні схеми заміщення.

Залежність між струмами і потокозчепленнями визначається видом прийнятої схеми заміщення для електричної машини і величинами індуктивностей. Якщо враховувати по одному демпферному контуру по осям симетрії ротора (рис. 1), то рівняння мають вид:

$$\begin{cases} \Psi_d = x_\sigma \cdot i_d + x_{ad} \cdot (i_d + i_{fd} + i_{1D}) \\ \Psi_{fd} = x_{\sigma f} \cdot i_f + x_{\sigma f1D} \cdot (i_{fd} + i_{1D}) + x_{ad} \cdot (i_d + i_{fd} + i_{1D}) \\ \Psi_{1D} = x_{\sigma 1D} \cdot i_{1D} + x_{\sigma f1D} \cdot (i_{fd} + i_{1D}) + x_{ad} \cdot (i_d + i_{fd} + i_{1D}) \\ \Psi_q = x_\sigma \cdot i_q + x_{aq} \cdot (i_q + i_{1Q}) \\ \Psi_{1Q} = x_{\sigma 1Q} \cdot i_{1Q} + x_{aq} \cdot (i_q + i_{1Q}) \end{cases} \quad (2)$$

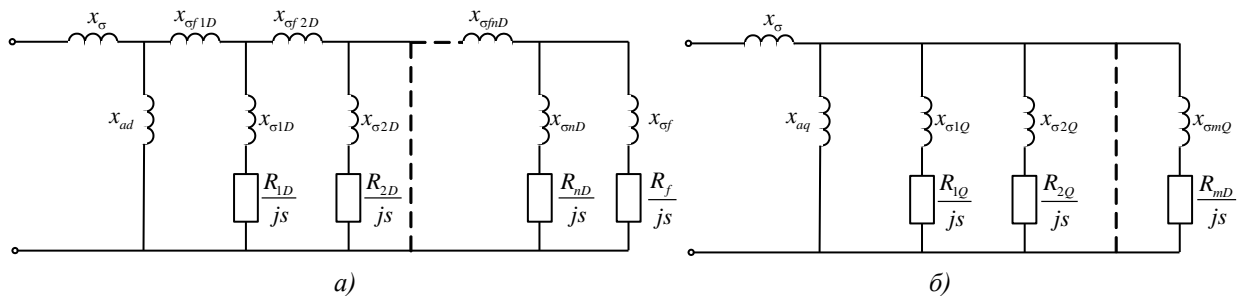


Рисунок 1 – Схеми заміщення синхронних машин за поздовжньою d і поперечною q осями симетрії ротора

Системи рівнянь (1)-(2) спрощуються в залежності від мети розрахунків [2].

Під час перехідних процесів в електричній системі проводяться спостереження зміни електрорушійних сил, струмів, напруг, потужностей, кутових швидкостей роторів та механічних моментів машин, що обертаються. Розрахунки, що дозволяють проаналізувати зміну цих величин при докладному обліку всіх елементів електричної системи, дуже складні. Тому природними є певні допущення, які дозволяють значно спростити аналіз.

Дослідження режимів електричної системи вимагає розгляду не тільки електромагнітних явищ, а й механічних явищ в її елементах: в первинних двигунах, їх автоматичних регуляторах, генераторах, двигунах навантаження, де електрична енергія знову перетворюється в механічну. Таким чином, необхідно розглядати як електричний, так і механічний стан електричної системи, тобто електромеханічні режими.

Оцінка електромеханічних процесів виконується за залежністю кута ротора $\delta = f(t)$, яка отримується з рівняння руху ротора [3]

$$P_T = P_{EM} + P_{los} + T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} + P_d \frac{d\delta}{dt}, \quad (3)$$

де: P_T – потужність турбіни, яка визначає початковий сталий режим електричної системи, P_{EM} – електромагнітна потужність генератора, P_{los} – втрати активної потужності в агрегаті, T_j – постійна інерції мас турбіни і генератора, що обертаються, δ – кут, який визначає просторове розміщення осі ротора, P_d – демпферний коефіцієнт.

Якщо знехтувати втратами в агрегаті P_{los} і демпферним коефіцієнтом P_d , що є допустимим і незначно вплине на точність розрахунків, то рівняння (3) приймає спрощений вид

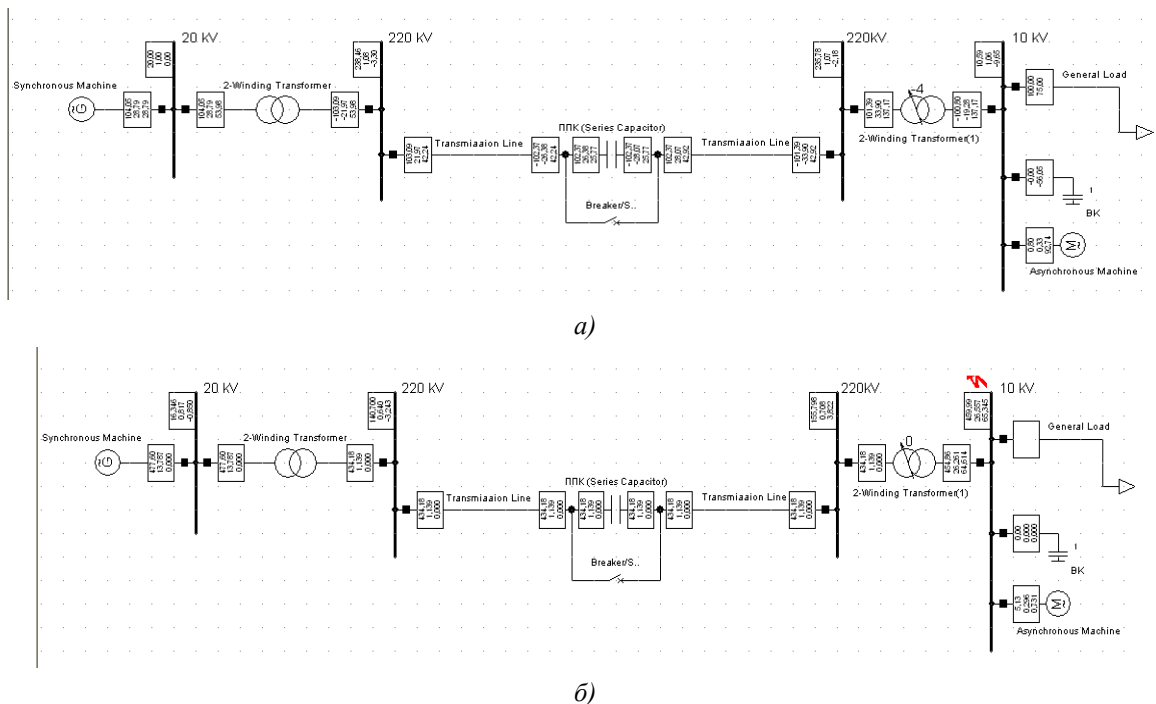
$$P_T - P_{EM} = T_j \frac{d^2\delta}{dt^2}, \quad (4)$$

$$P_T - P_{EM} = T_j \frac{d\omega}{dt} = T_j \cdot \alpha, \quad (5)$$

де: $\omega = \frac{d\delta}{dt}$ – кутова швидкість, $\alpha = \frac{d^2\delta}{dt^2}$ – кутове прискорення мас, що обертаються, $\Delta M = T_j \frac{d^2\delta}{dt^2}$ – надлишковий момент.

Найбільш універсальним методом якісного дослідження перехідних процесів є метод чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь. Недоліком є складність урахування багатомашинної системи; складнозамкненої, розгалуженої схеми електричної мережі і інше. Тобто в разі зміні оперативної схеми необхідно повторно виконувати перетворення схем мережі. В даний час при експлуатації реальної електричної мережі або проектуванні нових енергетичних об'єктів широко використовують моделі системи у програмному забезпеченні PowerFactory. Результати розрахунку перехідних процесів у PowerFactory виконуються на основі методів Ейлера та Рунге-Кутта для чисельного розв'язування диференціальних рівнянь та точних математичних моделей елементів електроенергетичних систем.

Математичний експеримент був виконаний для простішої радіальної схеми, приведена на рис. 2.



а – для режиму максимального навантаження, б – для аварійного режиму

Рисунок 2 – Схема мережі, яка досліджується

Отримані результати. В електричній мережі, яка розглядалася, був встановлений пристрій поздовжньої компенсації (ППК), на силових трансформаторах – пристрій регулювання напруги під навантаженням (РПН). Пристрій поздовжньої компенсації встановлюється для підвищення пропускної здатності лінії електропередачі

без збільшення перетину проводів [4]. Це додаткові конденсатори включені послідовно навантаженню в кола змінного струму, в яких протікає повний струм лінії електропередачі при нормальному режимі і струм короткого замикання при аварійному режимі.

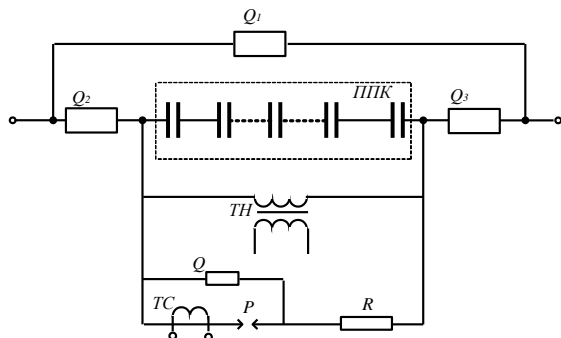


Рисунок 3 – Схема пристрою поздовжньої компенсації

Узагальнена схема ППК приведена на рис. 3. Вимикачі Q_1 , Q_2 і Q_3 необхідні для виведення ППК з роботи, проведення ремонту. Паралельно конденсаторам включений трансформатор напруги TH . Для захисту від перенапруг паралельно конденсаторам підключений обмежувальний опір R (або реактор, який обмежує струм), розрядник P , трансформатор струму TC і шунтовий вимикач Q .

Параметри генератора ТВВ-320: $P_{i\ o\ i} = 320$ МВт, $U_{i\ o\ i} = 20$ кВ, $S_{i\ o\ i} = 375$ МВА, $\cos \varphi_{i\ o\ i} = 0,85$, $x_d = 1,698$. Параметри силових трансформаторів: для трансформатора, що підвищує, - $S_{i\ o\ i} = 200$ МВА,

$U_{\hat{a}\ i\ o\ i} = 242$ кВ, $U_{i\ i\ o\ i} = 20$ кВ, $u_k = 11\%$, $\Delta P_{no\ load} = 330$ кВт, $\Delta P_{cop} = 880$ кВт, $I_{no\ load} = 0,5\%$; для трансформатора, що знижує, - $S_{i\ o\ i} = 125$ МВА, $U_{\hat{a}\ i\ o\ i} = 242$ кВ, $U_{i\ i\ o\ i} = 10,5$ кВ, $u_k = 11\%$, $\Delta P_{cop} = 380$ кВт, $\Delta P_{no\ load} = 120$ кВт, $I_{no\ load} = 0,55\%$. Довжина лінії електропередачі - 70 км. Сумарне навантаження підстанції складає 100 МВт, $\cos \varphi_{i\ o\ i} = 0,8$. Воно включає й асинхронні двигуни ($P_{i\ o\ i} = 800$ кВт, $\cos \varphi_{i\ o\ i} = 0,9$, $\eta = 95,3\%$, число пар полюсів $2p = 2$, номінальна частота обертання $n = 1500$ об/хвил.).

У таблиці 1 наведені результати порівняння вихідного режиму і режимів роботи мережі з використання запропонованих технічних заходів. Розраховувався сталий режим (режим максимального навантаження) і перехідний режим (трифазне коротке замикання).

Таблиця 1 – Зведені результати аналізу роботи схеми мережі

	Режим без РПН і без ППК	Режим без РПН і з ППК	Режим з РПН і з ППК
Втрата напруги в лінії електропередач, %	1,73	0,98	1,22
Відхилення напруги на шинах споживачів, %	10,76	9,62	0,86
Розвантаження генераторів за реактивною потужністю, %	вихідний режим	на 8,1 %	на 44,5 %
Втрати потужності в елементах мережі, %			
P_{Total} / Q_{Total}			
P_{load} / Q_{load}	3,68 / 17,3	3,60 / 14,5	3,25 / 9,50
P_{noload} / Q_{noload}	2,76 / 26,5	2,67 / 23,81	2,30 / 18,9
	0,92 / 9,20	3,68 / -9,31	0,95 / - 9,40
Рівень струмів короткого замикання, %			
мережа 220 кВ	вихідний режим	збільшився на 14,2 %	збільшився на 14,2 %
мережа 10 кВ		збільшився на 6,1 %	збільшився на 6,1 %

Включення ППК у лінію електропередач дозволило знизити втрати напруги в мережі на 0,75 %, знизити відхилення напруги на шині 10 кВ від бажаної напруги, яка визначається методом зустрічного управління напруги, на 1,14%. Незначно знизилася втрата активної потужності на 0,08%, але реактивної – на 2,8 %. Це дозволило розвантажити мережу від передачі реактивної потужності і, природно, розвантажити синхронні генератори на 8,1 %. Але, як і очікувалося, рівень струмів короткого замикання збільшився на шині 220 кВ споживчої підстанції на 14,2 %, а на шині 10 кВ – на 6,1 %. Тобто необхідно передбачати установку пристроїв обмеження струмів короткого замикання (реакторів, трансформаторів з розщепленою обмоткою низької напруги). Проте залежність кута вильоту ротора має меншу амплітуду і період згасання (рис. 4) ніж у вихідному режимі, тобто підвищується стійкість роботи електричної мережі.

Як зазначено в [4] структура сучасного протиаварійного керування є складним комплексом різноманітних пристроїв, призначеним запобігти виходу режиму роботи енергосистеми за границю області стійкості або забезпечити повернення в неї при порушенні нормального режиму. Комплекс пристроїв реалізує принцип ешелонованої оборони, суть якого така: на кожному рубежі захисту життєздатності енергосистеми вводяться в

дію все нові пристрої керування, призначенні припинити аварійний перехідний процес або хоча б зменшити його негативний вплив на енергосистему й отже, сприяти встановленню нового усталеного режиму. Так, на першому етапі виконуються дії, спрямовані на усунення збурення та послаблення його впливу на енергосистему. Це регулювання збудження, автоматичне форсування збудження тощо.

Використання пристроїв регулювання напруги під навантаженням на трансформаторах найбільш ефективний засіб забезпечення бажаної напруги на шинах споживачів. Відхилення напруги зменшилося (напруга піднялася до бажаного рівня) і не перевищує допустимого значення. Внаслідок підвищення рівня напруги на шинах 10 кВ, збільшується реактивна потужність, генерована пристроєм поперечної компенсації. Тому розвантаження синхронних генераторів складає 44,5 %. Так само залежність кута вильоту ротора має меншу амплітуду і період згасання, тобто підвищується стійкість роботи електричної мережі.

Застосування всіх технічних засобів одночасно дає максимальний ефект регулювання режимів електричної мережі і підвищення показників її функціонування.

Висновки. Розглянутий алгоритм раціонального управління електричними мережами з використанням технічних засобів (пристроїв компенсації реактивної потужності, пристроїв регулювання напруги). Оцінено роботу електричної мережі з позиції мінімізації втрат потужностей і стійкості роботи.

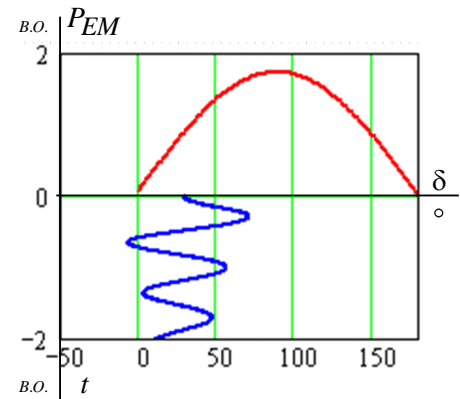


Рисунок 4 - Електромагнітна потужність P_{EM} і кут ротора δ

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gonen T Modern Power System Analysis / T. Gonen // CRC Press. – 2013.
2. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А.И. Важнов // Л.: Энергия – 1980.
3. Kundur P. Power system stability and control./ P. Kundur // McGraw-Hill. – 1994.
4. Поспелов Г.Е. Компенсирующие и регулирующие устройства в электрических системах / Г.Е. Поспелов, Н.М. Сыч, В.Т. Федин // Л.: Энергоатомиздат – 1983.
5. Букович Н.В. Протиаварійна режимна автоматика електроенергетичних систем / Н.В. Букович // Львів – 2003.

REFERENCES

1. Gonen, T (2013), Modern Power System Analysis, [Modern Power System Analysis], CRC Press, USA.
2. Vazhnov, A. (1980), Perehodnyie protsessy v mashinah peremennogo toka, [Transient Process in AC machines], Enerhiya, Leningrad.
3. Kundur, P (1994), Power system stability and control, [Power system stability and control], McGraw-Hill, USA.
4. Pospelov, G.E., Sych, N.M and Fedin, V.T. (1983), Kompensiruyuschie i reguliruyuschie ustroystva v elektricheskikh sistemah, [Compensating and regulating devices in electrical systems], Energoatomizdat, Leningrad.
5. Bukovich, N.V., (2003), Protyavariina rezhymna avtomatyka elektroenerhetychnykh system, [Anti-emergency mode automation of electric power systems], Lviv, Ukraine.

Надійшла до редколегії 05.11.2018

Рецензент: д.т.н., професор Сивокобиленко В.Ф.

G. SHEINA

State Institution of Higher Education “Donetsk National Technical University”

Research of an electrical network elements models for automation of its management. The scheme of the electric network, which includes the generator, the transformers, the electric transmission line, which includes the device of compensation, the complex equivalent load, which includes the asynchronous motor, the device of compensation, is considered. Mathematical modeling was carried out. The work of the scheme is considered in the mode of maximum load, and in the transition process. The algorithm of the electrical network estimation from the point of power losses minimization in steady-state regime, i.e. energy saving, and from the standpoint of the stability of the electrical network, is analyzed. The effectiveness of attracting existing technical measures to optimizing the distribution of power flows and providing optimal regimes is shown.

Key words: circuit of electric network, generator, transformer, power line, compensation, transition process, stability of network operation