

УДК 621.311:681.3

О. В. Кириленко, академік НАН України, **В. В. Павловський**, канд. техн. наук, **Л. М. Лук'яненко**, канд. техн. наук (Інститут електродинаміки НАН України, Київ), **Є. В. Зорін** (Національна Енергетична Компанія «Укренерго», Київ)

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЗА НАПРУГОЮ

Розглянуто визначення стійкості за напругою та найбільш поширені в європейських енергетичних системах методи її аналізу. Серед них виділено методи QV-, PV-кривих та VQ чутливості. Показано, що застосування вказаних методів дозволяє виявити «слабкі» шини в енергосистемі та визначити величину критичної напруги.

Рассмотрено определение устойчивости по напряжению и наиболее распространенные в европейских энергетических системах методы её анализа. Среди них выделяют методы QV-, PV-кривых и VQ чувствительности. Показано, что использование указанных методов позволяет выявить «слабые» шины в энергосистеме и определить величину критического напряжения.

Вступ. На думку провідних експертів [7,11] в середньо-та довгостроковій перспективі головну роль у виробництві електричної енергії відводиться атомній енергетиці. Це дозволить певною мірою здешевити вартість генерації електричної енергії, однак призведе до концентрації генеруючих потужностей в окремих енергорайонах. До того ж, разом з концентрацією виробництва активної потужності (яку необхідно передавати в енергодефіцитні райони) відбувається і концентрація генерування реактивної потужності (яку передавати по електричній мережі вкрай неефективно). Подальша концентрація генерування реактивної потужності на електростанціях, а також існуючий дефіцит в об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України сучасних мережевих засобів її компенсації, таких як, наприклад, гнучкі передачі змінним струмом [4], значно обмежують можливості з передачі активної потужності в інші регіони України. Так, вже сьогодні постає проблема передачі електричної енергії з Західної та Південно-Західної енергосистем ОЕС України, тобто з районів концентрації генерації (Хмельницька та Рівненська АЕС). Ця проблема безпосередньо спричинена вимушено обмеженою пропускною здатністю окремих перетинів за умови статичної стійкості режимів роботи ОЕС України. Мова йде, в першу чергу, про стійкість за напругою. Порушення стійкості за напругою та виникнення «лавини» напруги супроводжує практично кожен системну аварію [6,13]. Тому особливу актуальність для національної енергосистеми набувають питання аналізу сьогоденних та перспективних режимів з точки зору оцінки статичної стійкості за напругою. Це дозволить ідентифікувати такі енергорайони в ОЕС України та запровадити заходи щодо усунення проблем, що виникають при цьому.

Визначення поняття та класифікація стійкості за напругою. Через складність явищ та процесів, що проходять в електроенергетичних системах, «фізичне» поняття стійкості для зручності моделювання традиційно розкладають на складові. В країнах колишнього СРСР була досить поширена математична декомпозиція стійкості на поняття «стійкість паралельної роботи енергосистем» та «стійкість навантаження» [1,3]. В той же час, в країнах Європейського енергетичного об'єднання використовується дещо інша класифікація цього явища: «стійкість за кутом» та «стійкість за напругою» [10,12,16,17]. Зазначені різні математичні ідеалізації ні в якій мірі не протирічають одна одній, а лише по різному розглядають єдину фізичну суть стійкості енергосистем. При цьому, використання останнього підходу дозволяє більш чітко розділити загальне поняття на окремі математичні складові. Крім того, враховуючи перспективи України щодо входження до Європейської Енергетичної Спільноти, доцільно певним чином визначитися та залучити до використання сучасні світові підходи щодо аналізу стійкості режимів енергосистем.

Стійкість за напругою – це здатність енергосистеми підтримувати стійкі та прийнятні рівні напруги на всіх системах шин (СШ) як в нормальних, так і в післяаварійних та ремонтних режимах. Основною причиною неконтрольованого зменшення напруги та втрати стійкості є нездатність енергосистеми підтримувати в кожний момент часу баланс реактивних потужностей на окремій СШ або в окремій зоні системи після виникнення збурення. Критерій стійкості енергосистеми за напругою полягає у тому, що в поточному режимі на кожній СШ при збільшенні напруги величина реактивної потужності на тій самій СШ повинна збільшуватись. Тобто, система стійка за напругою при $\partial Q / \partial V > 0$. Величина напруги, яка відповідає переходу від стійкого стану до нестійкого (при $\partial Q / \partial V = 0$), називається «критичною напругою», а відповідний їй рівень реактивної потужності – «межею за реактивною потужністю».

Для подальшого аналізу використаємо наступну класифікацію стійкості за напругою. *Динамічна стійкість* за напругою пов'язана з оцінкою та підтримкою напруги впродовж 1–2 сек відразу після «великого» збурення. Мова йде, в першу чергу, про реакцію автоматики регулювання збудження (АРЗ) генераторів при короткому замиканні (КЗ). Особливу гостроту проблема динамічної стійкості за напругою набуває разом із зростанням частки відновлюваної енергетики в структурі генерації. Нетрадиційні генератори (на вітроелектростанціях) мають недостатні можливості щодо підтримки напруги під час КЗ або при інших аваріях в енергосистемі. Зокрема, коли напруга в мережі знижується, генератори на вітроелектростанціях за умовами експлуатації мають відключатися, що призводить до погіршення рівня динамічної стійкості за напругою в таких енергосистемах. Тому системні оператори (СО) багатьох європейських країн [19,20] встановили вимоги щодо паралельної роботи «нетрадиційних» генераторів. Мова йде, зокрема, про LVRT (Low Voltage Ride Through) або властивість генераторів проходити короткотривалі «провали напруги», не від'єднуючися від системи.

Статична стійкість за напругою належить до форми стійкості, що визначається переважно статичними характеристиками навантаження та параметрами мережі, що, як відомо, не залежать від часу та поточного режиму, який можливо розглядати як усталений протягом 2–10 сек. Як збурення розглядається втрата елемента енергосистеми або зростання навантаження.

Довгострокова стійкість за напругою враховує вплив на рівні напруги динаміки систем регулювання на генераторах, а також процесів, пов'язаних із закінченням резервів реактивної потужності протягом певного часу, роботою РПН (регулювання під напругою) автотрансформаторів (АТ) та трансформаторів (Т), перемиканням батарей статичних конденсаторів (БСК), шунтуючих реакторів (ШР) та дією режимної автоматики.

Враховуючи наведене, слід також зауважити, що порушення стійкості за напругою, як правило, виникає в системі досить рідко, більш часто оперативно-диспетчерський персонал стикається з явищем нестабільності напруги на певних СШ. Поняття стабільності напруги визначає ступінь коливання рівня напруги на СШ при коливаннях реактивної потужності на тих самих СШ або в системі взагалі. Для такої ситуації характерно, що вимоги стійкості за напругою в цілому виконуються (критерій $\partial Q / \partial V > 0$), але при цьому напруга нестабільна, тобто навіть незначні коливання реактивної потужності призводять до значних коливань напруги.

Незважаючи на те, що явище нестійкості за напругою носить, як правило, локальний характер, його поява може призвести до глобальних наслідків. Порушення стійкості пов'язано з виникненням лавини напруги, що може охопити великі енергорайони або навіть всю енергосистему. Тому аналіз граничних режимів, в яких саме відбувається порушення стійкості за напругою, є дуже важливим. Для великих сучасних енергосистем такий аналіз є достатньо складним через те, що, з фізичної точки зору, на порушення стійкості впливають багато чинників. Зокрема, це характеристики навантажень споживачів, структура та параметри електромережі, параметри режиму (перетоки по ЛЕП та АТ, склад генеруючого обладнання), характеристики потужності та поточні уставки систем регулювання на генераторах та інших пристроях компенсації (СТК – статичні тиристорні компенсатори, БСК) та перерозподілу (РПН АТ та Т) реактивної потужності.

Показники стійкості за напругою. Забезпечення умов надійної роботи енергосистем пов'язано з дотриманням визначених ще на етапі планування критеріїв режимної безпеки. Серед інших, до таких критеріїв належать:

- обмеження за термічною стійкістю ЛЕП та АТ;
- необхідні рівні резервів реактивної потужності на генераторах та СТК (БСК);
- припустимі рівні напруги;

- величина нормативних запасів зі стійкості за напругою.

Слід розрізняти також обмеження щодо рівнів напруги та запасів зі стійкості за напругою. Зокрема, для нормальних та ремонтних (аварійних) схем встановлено припустимі межі відхилення напруги від номінальної. Переважна більшість Кодексів Мереж СО європейських країн встановлює відхилення $\pm 10\%$ [19,20]. Запаси зі стійкості за напругою, у разі необхідності, можуть визначатися кожним СО окремо. Наприклад, в Україні такі запаси згідно з [2], становлять 10% і 15% та визначаються від рівнів напруги як 0,7 (0,75) в.о. від номінальної (нормальної) для СШ-110 кВ. Очевидно, що критичні місця за напругою, тобто ті, де напруга відхиляється більше, ніж на 10%, є потенційно небезпечними з точки зору можливості подальшого зменшення напруги та перетворення цих СШ у точки енергосистеми, де запаси стійкості за напругою не відповідають припустимим.

Однак стійкість за напругою може порушуватися і в тих ситуаціях, коли напруга на всіх СШ-110 кВ перевищує нормативне значення 0,7 (0,75) в.о. від номінальної (нормальної), тобто, критична напруга може бути вищою ніж та, що встановлена в [2]. Останнє можливо, зокрема, при встановленні в мережі потужних СТК або при впровадженні системи вторинного регулювання напруги на генераторах. В таких випадках СШ з критичною напругою більше, ніж 0,9 в.о. можуть бути критичним місцем за критерієм недостатнього запасу зі стійкості за напругою. Як показано у [8] при аналізі стійкості за напругою в граничних режимах з високою критичною напругою кращим індикатором наближення режиму до точки втрати стійкості є резерви з реактивної потужності, ніж рівень напруги.

При аналізі стійкості режимів за напругою важливо не тільки визначити граничний режим та відповідну йому критичну напругу, але і дослідити, як саме впливають параметри електричної мережі та режимів її роботи на величину критичної напруги. Саме такий аналіз є основою для розробки ефективних заходів для запобігання порушенню стійкості за напругою.

Для оцінки ступеня «важкості» режиму за напругою застосовуються різні показники, що вимірюють ступінь наближення поточного режиму до граничного за напругою, в якому спостерігається лавина напруги. Вони базуються на різних визначеннях та уявленнях про фізичну природу стійкості та доповнюють один одного. Наведемо наступні, найбільш поширені показники [8,10,12,16]:

- резерв реактивної потужності на електричних станціях та СТК, що визначає величину наближення в Мвар до граничного за напругою режиму;
- відхилення напруги від номінальних (або нормальних) значень, що дозволяє оцінити ступінь «важкості» режиму;
- втрати реактивної потужності в ЛЕП. Зокрема, стрімке зростання відношення втрат (Мвар) в ЛЕП до перетоку через перетин (МВт) визначає ступінь наближення режиму до виникнення лавини напруги [8];
- чутливість напруги до величини коливань реактивної потужності на СШ, що використовується для ідентифікації критичних за напругою зон електромережі або окремих СШ. Такі «слабкі» СШ можуть розглядатися як найбільш небезпечні місця з точки зору втрати стійкості за напругою при обважненні режиму;
- значення детермінанту Якобіану в рівняннях усталеного режиму (УР). При певних припущеннях (наприклад, щодо моделювання генераторів) перехід детермінанту через «0» відбувається в околі зони граничних за статичною стійкістю режимів [1]. Граничний режим може бути з певною вірогідністю ідентифікований за збіжністю ітераційного процесу розрахунку УР;
- результати модального аналізу, зокрема власні числа оберненого, скороченого Якобіану [18].

Методи ідентифікації найбільш небезпечних СШ за напругою. В першу чергу для ідентифікації найбільш небезпечних за напругою СШ, або іншими словами «вузьких місць», виділимо такі методи досліджень статичної стійкості за напругою [12,16]:

- метод $Q-V$ кривих для аналізу рівнів напруги відносно реактивної потужності на СШ;
- метод $P-V$ кривих для аналізу рівнів напруги на визначених СШ по відношенню до зростаючого перетоку активної потужності в перетині;
- метод аналізу чутливості напруги до варіацій реактивної потужності ($V-Q$ чутливість).

Перевагою зазначених методів є те, що вони позбавлені недоліків, пов'язаних з аналізом збіжності розрахунку УР. Визначення стійкості режиму за результатами досягнення точки розбіжності ітераційного процесу розв'язання нелінійних рівнянь УР є найбільш поширеною оцінкою, що часто використовується на практиці. Однак, вона має ряд недоліків. По-перше, розбіжність ітераційного процесу може бути пов'язана з обчислювальними проблемами обраного методу і не мати ніякого фізичного тлумачення. Тобто, така розбіжність не пов'язана з фізичною природою стійкості режиму за

напругою. По-друге, для дійсно нестійких режимів така оцінка не є інформативною щодо визначення природи порушення стійкості та локалізації критичних елементів або зон в енергосистемі в аспекті порушення стійкості за напругою. По-третє, існують випадки, коли дотримання умов існування режиму та збіжність процесу не гарантують стійку поведінку системи.

Метод Q - V кривих дозволяє досліджувати виникнення лавини напруги та нестабільність напруги на СШ. Q - V криві будуються за результатами розрахунків серії УР. На рис. 1 показано Q - V криві, кожна з яких представляє зв'язок між напругою (V) та реактивною потужністю (Q) при різних фіксованих значеннях активної потужності (P).

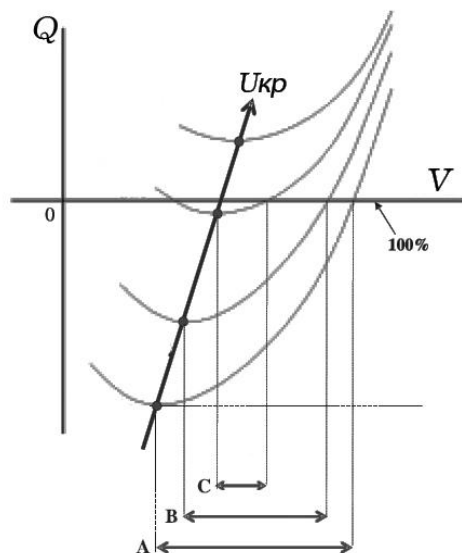


Рис. 1

Мінімальний екстремум певної Q - V кривої є критичною точкою (де $\partial Q / \partial V = 0$). Всі точки кривої праворуч від мінімуму вважаються стійкими, і навпаки, точки ліворуч відповідають нестійким режимам. Штучно стійка робота в області, де $\partial Q / \partial V < 0$, може бути досягнута тільки за умови спеціального регулювання реактивної потужності та при наявності достатнього діапазону компенсації. Кожній кривій відповідає певне активне навантаження у вузлі. Точка перетину Q - V кривої з віссю абсцис, що знаходиться праворуч від мінімуму, відповідає «природному» рівню напруги на СШ, який не потребує ні генерації, ні споживання реактивної потужності. Q - V крива, по суті, визначає «вимоги» СШ щодо генерування (споживання) реактивної потужності для підтримки заданого рівня напруги в ній при фіксації активного навантаження СШ.

Аналізуючи криві на рис. 1, можна зробити висновок, що із «підйомом» Q - V кривої угору (тобто із збільшенням навантаження) не тільки збільшується критична напруга, а також зменшується робочий (стійкий) діапазон системи. Тобто критична напруга «підпирає» робочий діапазон з одного

боку, а зсув всієї кривої — з іншого. Відповідні робочі діапазони (рис. 1) представлено як горизонтальні відрізки, що позначені літерами А, В, С. При аналізі Q - V кривих важливим також є їхній нахил: чим менший кут нахилу Q - V кривої до осі абсцис, тим більш нестабільна напруга на даних СШ. Основною перевагою Q - V аналізу є те, що він дає можливість визначити величину реактивної потужності, яка необхідна для забезпечення бажаного рівня напруги.

Метод P - V кривих дозволяє сформувати відповідні криві, що «зв'язують» напруги на певних СШ з перетоком активної потужності через перетин. P - V аналіз — це інструментарій, який дозволяє визначити реальну пропускну спроможність за активною потужністю через перетин в енергосистемі, що обмежується стійкістю за напругою. Для побудови P - V кривих виконується серія розрахунків, починаючи з деякого стаціонарного режиму, із подальшим збільшенням перетоку через перетин за встановленою траєкторією обважнення режиму, контролюючи при цьому напруги на СШ. Безпечний та стабільний стан енергосистеми знаходиться вище критичної точки. Перевагою даного підходу є те, що він дозволяє визначити «відстань» до точки лавини напруги у розмірності МВт. Кожна P - V крива визначає, по суті, величину граничного перетоку та критичну напругу для заданої траєкторії обважнення режиму. Основною перевагою P - V аналізу є те, що він дозволяє оцінити граничні рівні активної потужності, яка може передаватися через перетин з урахуванням рівнів напруги на певних (критичних) СШ.

Метод V - Q чутливості. Визначення стабільності напруги шляхом аналізу Q - V та P - V кривих для окремих СШ та перетинів, як правило, потребує виконання великої кількості розрахунків УР. Незважаючи на те, що такі процедури є традиційно автоматизованими [5], вони забирають багато часу і не завжди можуть дати оцінки, що дозволять тлумачити причини виникнення проблем зі стійкістю за напругою. Так, ці процедури фокусують увагу на окремих СШ, тобто характеристики стійкості встановлюються обтяженням кожної із шин окремо. Це інколи може спотворювати умови забезпечення стійкості енергосистеми. Крім того, для виконання Q - V та P - V аналізу СШ слід відбирати дуже ретельно, і може знадобитися велика кількість розрахунків відповідних кривих для отримання повної картини стійкості системи. Зважаючи на зазначене, було запропоновано низку спеціальних методів [14,16] для аналізу стійкості за напругою, одним із основних серед яких є метод V - Q чутливості. Перевагами цього методу є те, що він безпосередньо дає інформацію щодо стійкості енерго-

системи за напругою та оцінку міри стабільності напруги із загальносистемної точки зору і дозволяє визначити райони, які потенційно мають проблеми в зазначеному аспекті. Метод дозволяє ранжувати СШ за критерієм «слабкості» за напругою, а також визначити вплив регулювання реактивної потужності на генераторних СШ на рівні напруги на всіх СШ електромережі.

Як зазначено в [9,16], модель УР енергосистеми в лінеаризованій формі можна представити у такому вигляді:
$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\delta} & J_{PV} \\ J_{Q\delta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix},$$
 де ΔP , ΔQ , $\Delta\delta$, ΔV – прирости активної та реактивної потужностей, кута та амплітуди напруги на шинах; $J_{P\delta}$, J_{PV} , $J_{Q\delta}$, J_{QV} – елементи матриці Якобі, що відображають взаємну кореляцію (чутливість) між перетоками потужностей та зміною напруг на СШ.

Стабільність напруги в системі залежить від коливання P та Q . При цьому, якщо в кожній робочій точці забезпечити P постійним ($\Delta P = 0$), то можна оцінити стабільність напруги шляхом розгляду додаткових зв'язків між Q і V . Таким чином, якщо у наведеному рівнянні прийняти $\Delta P = 0$, то: $\Delta Q = J_R \cdot \Delta V$, або $\Delta V = J_R^{-1} \cdot \Delta Q$, де $J_R = [J_{QV} - J_{Q\delta} \cdot J_{P\delta}^{-1} \cdot J_{PV}]$.

Матриця J_R , є скороченим Якобіаном, а її i -им діагональним елементом є $V-Q$ чутливість на шині i . Недіагональні елементи матриці J_R визначають зміни напруги на i -ій шині у зв'язку зі зміною балансу реактивної потужності на різних СШ системи. Позитивне значення $V-Q$ чутливості свідчить про стабільну роботу певних СШ. Чим менше величина чутливості, тим більш стійкою є система. При зменшенні стабільності напруги величина чутливості збільшується і стає нескінченною ($+\infty$) на межі стійкості енергосистеми. Чинним є і зворотне твердження: негативна $V-Q$ чутливість свідчить про нестійку роботу системи. Від'ємне значення величини чутливості свідчить про виникнення нестійкого режиму роботи енергосистеми. Значення $V-Q$ чутливості на СШ взаємопов'язано з кутом нахилу відповідної $Q-V$ кривої в певній робочій точці. Зокрема, чим більший кут нахилу $Q-V$ кривої в певній точці, тим менша $V-Q$ чутливість та більша стійкість системи в цій самій точці.

Результати досліджень режимів напруги для тестової схеми IEEE. З метою аналізу можливостей вибраних методів було проведено моделювання режимів на тестовій схемі (рис. 2), яка використовується інститутом IEEE [15].

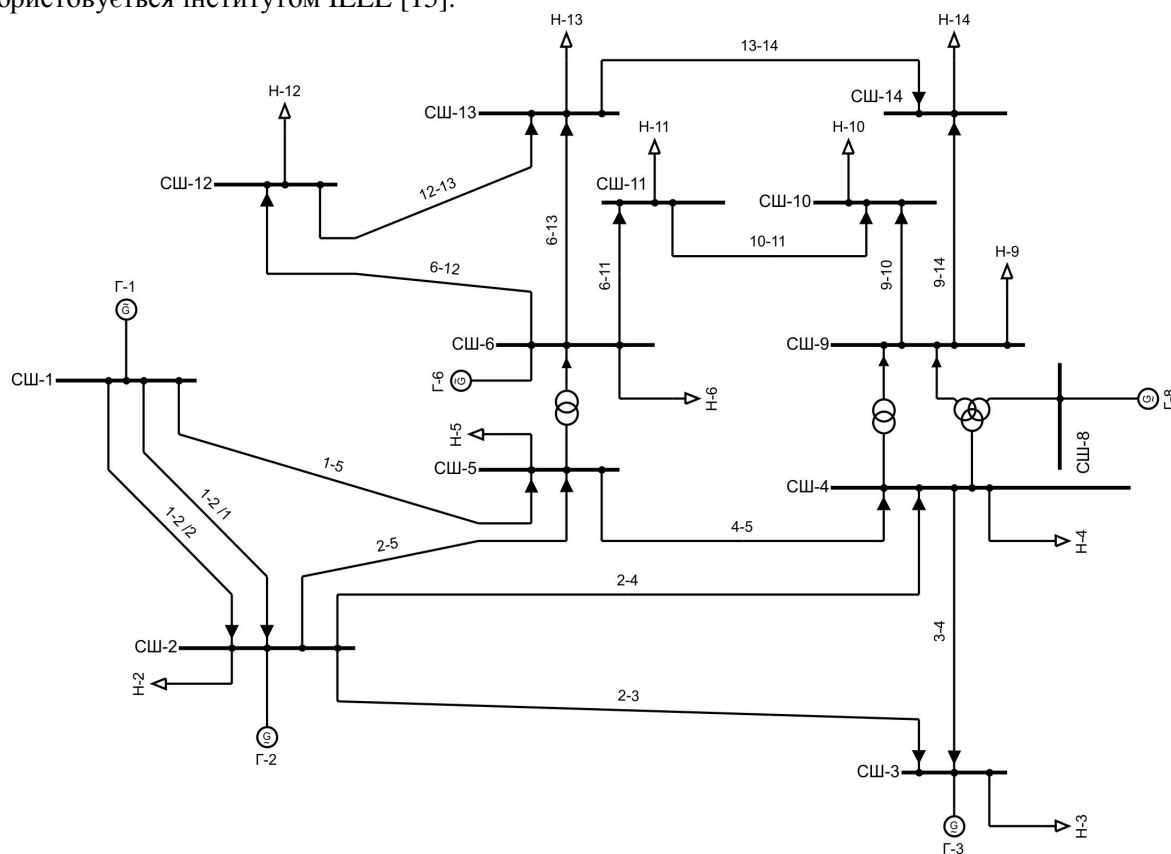


Рис. 2

Для визначення критичних за напругою СШ на тестовій схемі IEEE були виконані розрахунки $V-Q$ чутливості у двох режимах: у режимі мінімуму (режим А) та максимуму навантажень (режим Б), результати яких показано на рис. 3 (режим мінімальних навантажень – рис. 3, а, максимальних навантажень – рис. 3, б). На підставі цих розрахунків були визначені СШ – найбільш критичні в аспекті стійкості за напругою, і щодо яких для більш детального дослідження було проведено аналіз $Q-V$ кривих.

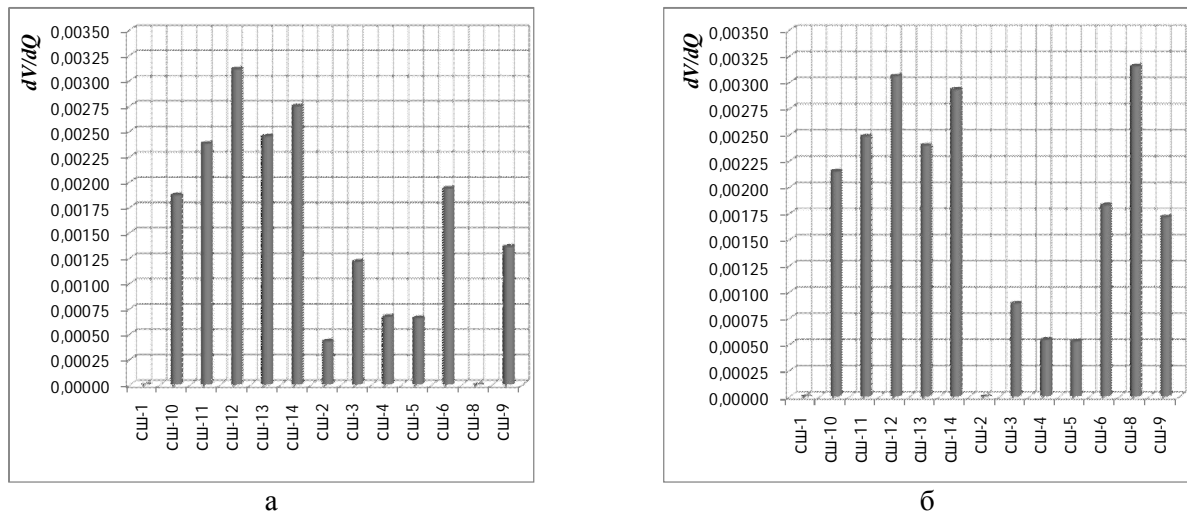


Рис. 3

Аналіз наведених гістограм показав, що в режимі мінімальних навантажень найбільш нестабільними є група віддалених шин СШ-11÷СШ-14, серед яких виділяється шина СШ-12. У режимі максимуму до вже зазначеної групи «слабких» СШ додалася генераторна СШ-8, що пояснюється вичерпанням резервів з реактивної потужності на генераторі, приєднаному до цієї СШ. Таким чином, «слабкість» СШ відносно напруги визначається не тільки параметрами мережі, а ще й режимом її роботи. Останнє дозволяє зробити важливий висновок стосовно того, що «слабкість» СШ визначається також і режимом енергосистеми, що потребує постійного уточнення в «on-line» режимі. За таких обставин, необхідно постійно проводити контроль за резервами з реактивної потужності, що дозволяє забезпечити стабільну роботу енергосистеми.

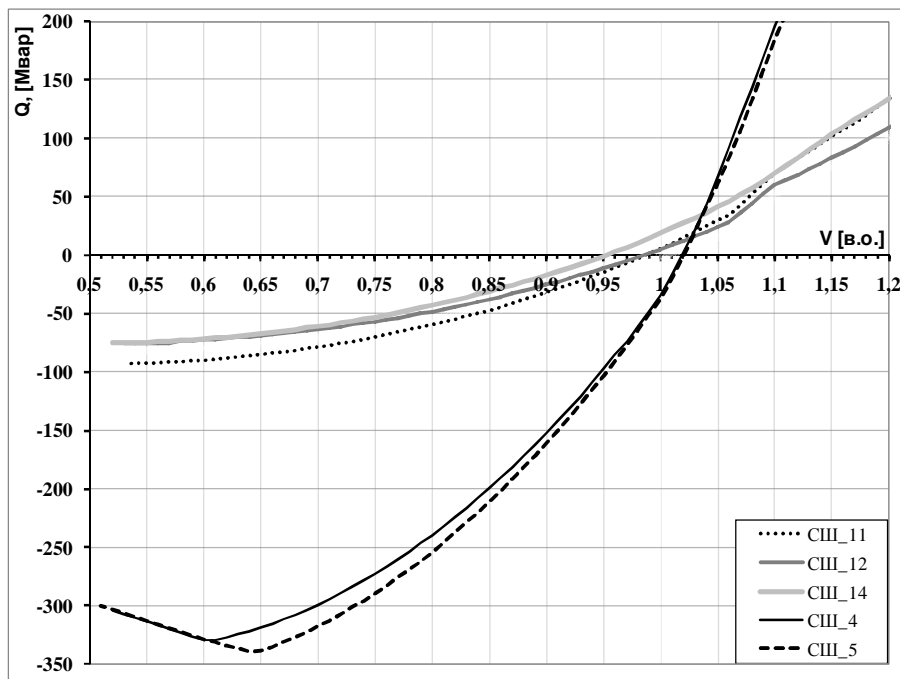


Рис. 4

Крім того, для СШ тестової схеми IEEE були побудовані $Q-V$ криві для режиму максимуму навантажень, які показані на рис. 4. На графіках можна чітко виділити дві групи СШ, які відповідають СШ із напругами 230 кВ (СШ-4, СШ-5) та 110 кВ. Як уже зазначалось, чим менший кут нахилу $Q-V$ кривої до вісі абсцис, тим більше буде проявлятися негативний вплив коливання реактивної потужності на рівень напруги на СШ. Із графіків видно, що найбільш нестабільними в зазначеному аспекті є СШ-12 та СШ-14, що повністю

співпадає з результатами аналізу $V-Q$ чутливості.

Отже, для всебічного аналізу наведеної тестової схеми (рис. 2) було побудовано серію $P-V$ кривих (рис. 5). При цьому об'єкту режиму виконувалося за допомогою збільшення навантаження на СШ-4. Було виконано кілька дослідів із різними значеннями $\cos\varphi$. Традиційно $P-V$ криві будуються при $\cos\varphi = \text{const}$.

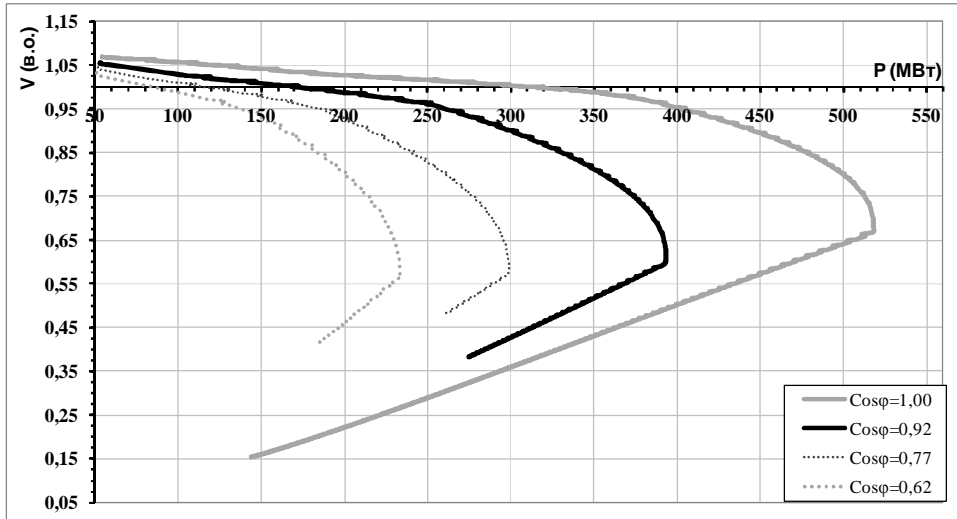


Рис. 5

на підставі аналізу наведених графіків можна зробити висновок, що, підтримуючи рівень напруги на «критичних шинах» в енергосистемі, можна збільшити пропускну спроможність перетину.

Це повністю відповідає практиці диспетчерського керування в енергосистемах, де виникають проблеми з підтримкою рівнів напруги (зокрема перетин ОЕС України–Крим). При цьому диспетчер контролює, в першу чергу, перетоки активної потужності через перетин відповідно до максимально допустимого значення, яке визначено для певного $\cos\varphi$. При досягненні максимально допустимих значень диспетчер починає контролювати напругу на критичних СШ. Якщо напруга знаходиться в допустимих межах, то диспетчер може виконати подальше збільшення транзитної потужності. В даний час визначення максимально допустимого перетоку активної потужності через перетин диспетчер виконує вручну. При цьому доцільно рекомендувати використовувати представлену групу кривих, що дозволяє провести оцінку максимально допустимого перетоку активної потужності із врахуванням рівнів напруги на відповідних (критичних) СШ.

Висновки. Розглянуто найбільш поширені в європейських енергетичних системах методи аналізу статичної стійкості за напругою, а саме аналіз $V-Q$ чутливості (чутливість напруги на СШ від змін реактивного навантаження на СШ) та методи $Q-V$ та $P-V$ кривих. Показано, що аналіз $V-Q$ чутливості дає можливість досить оперативно оцінити стан усіх систем шин в енергосистемі та ступінь їхнього взаємного впливу, а методи $Q-V$ та $P-V$ кривих дозволяють детально досліджувати та аналізувати режими роботи систем шин.

Проведено дослідження стійкості за напругою на тестовій схемі IEEE, визначено найбільш критичні СШ та сформульовано фактори, що можуть призводити до порушення стійкості в цих точках. При цьому виявлено, що «слабкість» систем шин відносно напруги визначається не тільки параметрами мережі, але і режимом роботи енергосистеми. Тому отримані на етапі планування режимів запаси зі стійкості за напругою та допустимі перетоки через перетини потребують оперативного уточнення в режимі «on-line». За таких обставин автоматизований контроль за наявними резервами з реактивної потужності для забезпечення стабільної роботи енергосистеми є невід'ємною частиною роботи системного оператора.

Запропонований підхід слід рекомендувати для застосування у великих енергетичних системах, таких як ОЕС України, що дозволить виконувати автоматизований аналіз та моніторинг стій-

Із графіків на рис. 5. видно, що при зменшенні коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$), тобто із збільшенням споживання реактивної потужності, значно зменшуються запаси за статичною стійкістю та пропускну спроможність перетину. Це підтверджує положення, що нестача реактивної потужності (або значне її споживання) можуть суттєво впливати на транзит активної потужності та стійкість всієї системи. Також

кості за напругою як на етапі планування режимів, так і на етапі оперативного керування. В першу чергу, це стосується таких напружених перетинів як ОЕС України – Крим.

1. *Веников В.А.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа. – 1985. – 536 с.
2. *ГКД 34.20.575–2003.* Галузевий керівний документ. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки. Інструкція. Видання офіційне.
3. *Жданов П.С.* Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия. – 1979. – 456 с.
4. *Кириленко О.В., Павловський В.В.* Режимне застосування систем гнучких передач змінним струмом в енергосистемах // Техн. електродинаміка. Тем. випуск. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2007. – Ч. 1. – С. 88–91.
5. *Кириленко А.В., Прихно В.Л., Черненко П.А.* Разработка иерархического оперативно-управляющего комплекса и внедрение его в энергообъединения Украины // Наука та інновації. – 2008. – № 6. – С. 12–25.
6. *Коган Ф.Л.* О причинах развития известной аварии в Московской энергосистеме // Электричество. – 2008. – № 5. – С. 69–72.
7. *Обзор мировой энергетики* // Энергоэксперт. – 2008. – № 4.
8. *Стогий Б.С., Кириленко О.В., Павловський В.В., Левконюк А.В.* Підвищення пропускної здатності «слабких» перетинів енергосистем з використанням технології ГПЗС (FACTS) // Техн. електродинаміка. – 2009. – №2. – С. 63–68.
9. *Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики.* Учебник для студентов вузов под ред. В.А.Веникова, - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1981. – 288 с.
10. *Ajjarapu V.* Computational techniques for voltage stability assessment and control. – Springer, 2006. – 250 p.
11. *CIGRE Session 43 Preferential subjects* (<http://www.cegre.org>)
12. *Cutsem V., Vournas T., Kluwer C.* Voltage Stability of Electric Power Systems – Kluwer Academic Publishers Group, Boston, 1998. – 379 p.
13. *Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations.* – 2003.
14. *Flatabo N., Ognedal R., Carlsen T.* Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods // IEEE Trans. – 1990. – Vol. 5. – № 4. – Pp. 1286–1293.
15. *Kodsi S.K.M., Canizares C.A.* Modeling and simulation of IEEE 14 bus system with facts controllers. Technical Report, University of Waterloo. – 2003. – 54 p.
16. *Kundur P.* Power system stability and control – McGraw-Hill, 1994. – 1176 p.
17. *Kundur P., Paserba J., Ajjarapu V. and other.* Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions // IEEE Trans. On Pow. Sys. – 2004. – V. 19 – № 2. – Pp. 1387–1401.
18. *Pinto H.J.C.P., Martins N., Vieira X. and other.* Modal Analysis For Voltage Stability: Application at Base Case and Point of Collapse / Bulk Power System Voltage Phenomena – III Voltage Stability, Security & Control Conference, Davos, Switzerland, 22–26 August 1994.
19. *The grid code.* National Grid Electricity Transmission plc. 2006. [Online].
20. *Transmission Code 2007.* Network and System Rules of the German Transmission System Operators. BDEW, 2007. [Online].

Надійшла 19.01.2010