

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА УСЛОВИЯТА ЗА УСТОЙЧИВА РАБОТА НА АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ ПРИ КОМПЕНСИРАНЕ НА РЕАКТИВНА МОЩНОСТ В ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА МРЕЖА

Евтим Кърцелин

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ: Въпросите за устойчивата работа на електропотребителите е тясно свързана с тяхната експлоатационна надеждност и много зависят от показателите за качество на електроенергията. Изследвана е задачата за определяне на условията за устойчива работа на асинхронни двигатели при използване компенсация на реактивната мощност в електрическата мрежа с кондензаторни батерии.

DETERMING THE CONDITIONS FOR STABLE FUNCTIONING OF ASYNCHRONOUS MOTORS WHILE COMPENSATING REACTIVE POWER IN THE ELECTRIC NETWORK

Evtim Kurcelin

University of mining and geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, Bulgaria

ABSTRACT: The issue of stable functioning of electricity consumers is closely related to their operational reliability and depends on the index of the electrical energy quality. The purpose of this paper is to determine the conditions for stable functioning of asynchronous motors when using condenser battery compensation of reactive power in the electric network.

Върху влошаване на условията за устойчивата работа на електропотребителите оказват влияние редица фактори: несинхронно включване в енергосистемата, различни видове аварийни ситуации (къси съединения с голяма продължителност, прекъсване на една от фазите на захранващата мрежа и др.), режима на работа и мощността на кондензаторните уредби, взаимното влияние на режимите на работа на самите електропотребители (в частност асинхронни двигатели) и др.

Ще се изследва задачата за определяне на условията за устойчива работа на най-разпространените електропотребители в промишлените предприятия – асинхронните двигатели, при наличието на компенсация на реактивна мощност с помощта на кондензаторни уредби КУ.

Устойчивостта на работа на асинхронния двигател може да се наруши, както в установен, така и в динамичен режим работа. Динамичната устойчивост на АД се характеризира с неговата способност да възстанови нормалните си обороти след отстраняване на причините за възникване на съответната аварийна ситуация в електроуредбата.

Устойчивата работа на електропотребителите, включително и на асинхронните двигатели при наличието на кондензаторни батерии се определя с изпълнението на следното неравенство

$$\frac{dQ}{dU} < 0 \quad (1)$$

където: Q - реактивна мощност, консумирана от асинхронните двигатели, КВАР.

Консумираната от асинхронния двигател реактивна мощност има следните компоненти:

- реактивна мощност на намагнитване Q_{μ} , която не зависи от натоварването на двигателя и се определя с израза:

$$Q_{\mu} = \frac{3U^2 \phi}{X_{\mu}} \quad (2)$$

където: X_{μ} - индуктивно съпротивление на намагнитващата верига на асинхронния двигател, Ом;

- реактивна мощност на разсейване Q_r , зависеща от натоварването:

$$Q_r = \frac{3U^2 \phi}{X \left[\left(\frac{S_{kp}}{S} \right)^2 + 1 \right]} \quad (3)$$

където: X – реактивно съпротивление на асинхронния двигател, Ом;

S и $S_{кр}$ - хлъзгане и критично хлъзгане на асинхронния двигател.

Електромагнитният въртящ момент на асинхронния двигател $M_{ел}$ при изменение на напрежението се определя по известната опростена формула на Клос:

$$M_{ел} = \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^2 \cdot \frac{2M_{кр}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}} \quad (4)$$

където: $M_{кр}$ - максимален (критичен) въртящ момент на асинхронния двигател при номинално напрежение $U_{ном}$.

От формула (2) се вижда, че реактивната мощност е право пропорционална на квадрата на напрежението, т.е.

$$\frac{Q_{\mu}}{Q_{\mu ном}} = q_{\mu} = \gamma^2 = \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^2 \quad (5)$$

Ако във формула (3) отношението $S_{кр}/S$ се замени от формула (4), то след несложно преобразуване се получава следния израз:

$$Q_r = \frac{U_{ном} M_{ел}^2}{2U^2 X M_{кр}^2 \left[1 - \left(\frac{M}{M_{кр}} \right)^2 \left(\frac{U_{ном}}{U} \right)^2 \right]} \quad (6)$$

От формула (6) следва, че мощността на разсейване на асинхронния двигател е обратно пропорционална на квадрата на напрежението:

$$\frac{Q_r}{Q_{r ном}} = q \equiv \frac{1}{\gamma^2} \quad (7)$$

Установеният режим на работа на асинхронния двигател се определя от условието за равенство между въртящия момент на двигателя и съпротивителния момент на задвижваната машина, т.е. от пресечната точка на двете моментни характеристики.

Следователно, при даден съпротивителен режим за всеки асинхронен двигател има определен критичен режим, който се характеризира с това, че при понататъшното намаляване на напрежението работата на асинхронния двигател става неустойчива.

Изхождайки от това, критичния режим на асинхронния двигател е възможно да се изрази със следните две условия:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM}{dS} &= 0 \\ \frac{dQ}{dU} &= \infty \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

От формула (5) следва, че нарушаване условията за устойчива работа на АД е възможно да настъпи и по-рано, при някаква друга стойност на напрежението в точка, за която е изпълнено условието:

$$\frac{dQ}{dU} = 0$$

В този случай е очевидно, че анализа за устойчивата работа на асинхронния двигател е целесъобразно да се изпълни по формула (1).

Ще се направи сравнение на статичните характеристики на захранващия източник и на консуматора на електроенергия до и след компенсация на реактивната мощност.

Статичната характеристика на източника на енергия (например, генератор) се определя от баланса на напреженията в началото U_1 и края U_2 на захранващата линия с отчитане на загубите на напрежение ΔU , а именно:

$$U_1 = U_2 + \Delta U = U_2 + \frac{PR + QX}{U_2} \quad (9)$$

Повдигайки на квадрат двете части на уравнението (9) ще се получи следния израз:

$$U_1^2 = U_2^2 + 2(PR + QX) + \left(\frac{PR + QX}{U_2} \right)^2 \quad (10)$$

След съответните алгебрични преобразувания спрямо Q се получава следното уравнение

$$dQ^2 + \epsilon Q + c = 0 \quad (11)$$

където:

$$\left. \begin{aligned} a &= X^2 \\ \epsilon &= 2X(U_2^2 + PR) \\ c &= U_2^4 + 2PRU_2^2 - U_1^2U_2^2 + (PR)^2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Замествайки тези стойности в (11) се получава следния израз:

$$Q_{1,2} = \frac{-U_2^2 + PR}{X} \pm \frac{U_1 U_2}{X} \quad (13)$$

Знакът "плюс", получен при коренуването се отнася за неустойчивата част на статичната характеристика.

Статичните характеристики на товара е възможно да се изразят също с уравнение от вида (13). Те ще се характеризират с две стойности: коефициент за наклона на характеристиката и стойност на напрежението U_{\min} , при което статичната характеристика достига минимум.

След това двете характеристики на източника и на потребителя е възможно да се съберат, в резултат на което се получава една обобщена характеристика на източника и консуматора на енергия до момента на компенсиране на реактивната мощност.

След монтаж на кондензаторно устройство за компенсиране на реактивната мощност израза (9) (при условие, че стойността на напрежението в края на линията ще има същата стойност U_2 , което след включване на кондензаторното устройство се постига чрез изменение коефициента на трансформация на силовите трансформатори) ще приеме следния вид:

$$U_1 = U_2 + \frac{PR + (Q - Q_{ky})X}{U_2} \quad (14)$$

Повдигайки на квадрат двете части на уравнението (14) ще се получи следния израз:

$$U_1^2 = U_2^2 + 2[PR + (Q - Q_{ky})X] + \left[\frac{PR + (Q - Q_{ky})X}{U_2} \right]^2 \quad (15)$$

Преобразувайки уравнение (15) спрямо Q ще се получи уравнение от вида (11), но с коригирани коефициенти, които ще имат следното представяне:

$$a'Q^2 + b'Q + c' = 0 \quad (16)$$

където:

$$\left. \begin{aligned} a' &= a = X^2 \\ b' &= b - 2X^2 Q_{ky} \\ c' &= c - XQ_{ky}(2U_2^2 - 2PR + Q_{ky}X) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Замествайки стойностите на коефициентите от (17) в (16) за корените на (16) се получава следния израз:

$$Q_{1,2} = \frac{-A \pm \sqrt{(A)^2 - 4X^2 \cdot B}}{2X} \quad (18)$$

където: $A = b - 2X^2 Q_{ky}$

$$B = c - XQ_{ky}(2U_2^2 - 2PR + Q_{ky}X)$$

Мощността на кондензаторната уредба се определя по известния израз:

$$Q_{ky} = 2\pi f c U^2.$$

Тъй като $Q_{ky} \equiv U^2$, а стойността на промишлената честота е точно определена и $f = 50 \text{ Hz}$, то за статичната характеристика след компенсация на реактивната мощност с помощта на кондензаторна уредба ще се получи следния израз:

$$Q_{1,2} = \frac{0,6X^2 c U^2 - 2X \cdot C \pm \sqrt{2X \cdot D}}{2X^2} \rightarrow \frac{-4X^2 [E - 0,3XcU^2 \cdot F]}{2X^2} \quad (19)$$

където: $C = U_2^2 + PR$

$$D = U_2^2 + PR - 0,6X^2 c U_2^2$$

$$E = U_2^2 - 2PRU_2^2 - U_1 U_2 + (PR)^2$$

$$F = 2U_2^2 - 2PR + 0,3XcU_2^2$$

Знаейки стойностите на коефициентите a, a', b, b', c, c' по уравненията (11), (16) и (19) за различни стойности на напрежението U_2 се изчисляват статичните характеристики преди и след компенсация на реактивната мощност.

Анализът на формулите за статичните характеристики на електроконсуматорите преди и след компенсация на реактивната мощност показва, че компенсацията при промишлените електроконсуматорите с помощта на кондензаторните уредби води до изменение на статичните характеристики на захранващата система и на електропотребителя. При компенсация на реактивна мощност критичното напрежение U_{\min} се приближава към номиналната стойност на напрежението и ъгълът на наклона на статичната характеристика нараства, при което с повишаване степента на компенсация, а също така и с увеличаване на еквивалентното съпротивление на мрежата ефектът нараства.

По такъв начин, компенсация на реактивна мощност с помощта на кондензаторни уредби води до намаляване на запаса на устойчивост на електрическата система.

Основният извод е, че с увеличаване мощността на кондензаторните уредби за компенсиране на реактивната мощност при поддържане на постоянно ниво на напрежението, отрицателно влияние върху устойчивостта

на товара в тези случаи, при които общото индуктивно съпротивление $\sum X_1$ (преди всичко съпротивленията на понижаващия трансформатор и на захранващата линия) е по-голямо от външното еквивалентно индуктивно съпротивление на товара X_2 , т.е. при изпълнение на условието

$$\sum X_1 > X_2 \quad (20)$$

От неравенство (20) следва, че с увеличаване на $\sum X_1$ (а това може да стане само при включването на кондензаторни устройства за компенсация на реактивна мощност или при намаляване на X_2 , което е възможно да се получи при увеличаване коефициента на трансформация на трансформатора) устойчивостта на товара се намалява.

От всичко изложено следва, че при определени условия може да се окаже недопустимо използването на кондензатори поради това, че те стават причина за намаляване на устойчивостта (особено при асинхронните двигатели, при които в процеса на работа при такава ситуация е възможно да възникнат явленията: самоизключване, обръщане, спиране и т.н.).

Ето защо тези явления следва да се отчитат и контролират, особено при определянето на строги условия за генерация и консумация на реактивна мощност.

Литература

Дансис Я.Б. и др., Емкостная компенсация реактивных нагрузок мощных токоприемников промышленных предприятий, М., Энергия, 1980.

Веников В.А. и др., Статические источники реактивной мощности в электрических сетях, М., Энергия, 1975.

*Препоръчана за публикуване от
Катедра "Електрификация на минното производство", МЕМФ*

