

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА КАЧЕСТВОТО НА
ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ ВЪРХУ НАДЕЖНОСТТА НА
ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ СЪОРЪЖЕНИЯ И СИСТЕМИ**

Панчев Р.К., Георгиев Г.А., Киров Р.М., Панчев Х.И.

Технически университет – Варна

Бургаски свободен университет

Технически университет – Варна

Технически университет – Варна

**STUDY ON INFLUENCE OF THE QUALITY OF THE ELECTRICAL
ENERGY ON THE RELIABILITY OF THE ELECTRICAL EQUIPMENT AND
SYSTEMS**

Panchev R.K., Georgiev G.A., Kirov R.M., Panchev H.I.

Technical university Varna

Burgas Free University

Technical university Varna

Technical university Varna

Abstract

As a result of many years of research on real industrial sites, a probabilistic - statistical methodology estimating the influence of the quality of the electric energy on the reliability and operational resource of the power equipment and systems has been synthesized. Specific results are provided that allow the residual resource of different power elements from the electric power supply systems to be estimated. Methodological guidelines for the application of diagnostic methods for the analysis of the state of electric power supply systems are formulated.

Keywords: reliability, probabilistic - statistical methodology

ВЪВЕДЕНИЕ

Допълнителните загуби на активна мощност при несиметрични и несинусоидални режими (ННР) предизвикват допълнително нагряване на изолацията, с което съществено се намалява живота на електрообзавеждането. За оценка на това явление се използва т.н. кратност на снижение на живота на елементите ψ , определен от израз [1]:

$$\psi = e^{K_n} [o. e.] \quad (1)$$

където: K_n - коефициент на деформация (изкривяване) отчитащ несиметрията и несинусоидалността при работата на електротехническите съоразения.

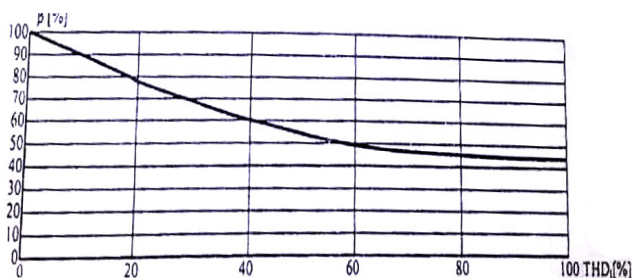
За СТ е известно, че загубите на ЕЕ в тях е в границите (7÷14)% [3,4,5] от цялото количество на трансферирана през тях ЕЕ, ка-

то по-големите стойности се отнасят за силно изразени ННР. Във връзка с повишената вероятност за претоварване на СТ от висши хармоници (в.х.) и несиметрия на токовете, Европейският комитет по нормиране на показателите на ЕЕ (CENELEC) препоръчва избора на мощността на СТ да става с известен коефициент на запаса K_3 , отчитащ нелинейния характер на товара по формулата [5,6]:

$$K_3 = \sqrt{1 + 0,23 \left(\frac{I_1}{\sqrt{\sum_{v=1}^{\infty} I_v^2}} \right)^2 \cdot \sum_{v=2}^{40} v^{1.75} \cdot \left(\frac{I_v}{I_1} \right)^2} \cdot 100\% \quad (2)$$

където: v – номер на хармоника; I_1 и I_v – основен и v -и хармоник на тока.

На фиг. 1 е показана примерна зависимост на коефициента на допустимо натоварване β : $\beta = f(\text{THD})$ за СТ 10/0,4kV[2,4]. От фигурата се вижда, че колкото е по-голяма степента на нелинейност на товара, толкова е по-малко допустимото натоварване на СТ. Изследванията на различни автори показват [5,6], че с продължаване на експлоатацията на СТ над нормативно определения срок (15 - 25 г), значително се увеличават загубите по празен ход (ΔP_0) и к.с. (ΔP_k), като тази зависимост е пропорционална на \sqrt{v} . Физически това се обяснява с увеличение от 2 до 4 пъти за $v=3$ до $v=13$ хармоник съпротивлението на к.с. на СТ вследствие повърхностния ефект и ефекта на близост.



Фиг. 1. Зависимост $\beta = f(\text{THD})$ за СТ

Загубите на празен ход ΔP_0 рязко се увеличават и вследствие на многократното пренамагнитване на магнитната сърцевина, което при наличие на в.х. е по-интензивно. В резултат на това се отделя топлина от намагнитващите намотки, която се отлага в магнитопровода и с течение на времето това води до структурни промени, т.е. предизвиква се ускорено стареене, съпроводено с влошаване на магнитните свойства на СТ. На второ място ΔP_0 се увеличават от механични вибрации при нормални режими, електродинамичните усилия при к.с. и др. механични въздействия. Тези процеси се засилват след ремонт на СТ.

Максималният допустим живот на СТ, определен в границите (25-30г), зависи най-вече от топлинното износване на изолацията на намотките. В резултат на нейното стареене рязко се увеличава ΔP_k , като съществено влияние оказва натоварването, работата при ННР, систематичните претоварвания на СТ, качеството на маслото, ефективността на системата за охлаждане, конструктивните особености на СТ и др. Сами-

те СТ поради несиметричната конструкция на магнитопровода, също са източник на в.х. и несиметрия на намагнитващия ток I_μ .

$$I_\mu = \frac{I_{\mu_A} + I_{\mu_B} + I_{\mu_C}}{3} \quad (3)$$

Крайните токове I_{μ_A} и I_{μ_C} се различават от средния I_{μ_B} като съотношението е $I_{\mu_A} = I_{\mu_C} \approx (1,3 \div 1,35)I_{\mu_B}$

За КБ допълнителните разходи от повишените загуби на мощност при наличие на в.х. $\Delta P_{\text{вх}}$ се определят, като се държи сметка и на топлинния режим на КБ, като най-напред се определя $\Delta P_{\text{вх}}$ по формулите [10].

$$\Delta P_{\text{вх}} = Q_{\text{КБ}} \cdot \text{tg} \delta \cdot e^{\gamma(\tau - \tau_0)}; \quad (4)$$

$$\tau = \tau_{\text{ср}} + \left(\frac{\Delta P_{\text{вх}}}{F}\right)^{0,8} + \rho \cdot \Delta P_{\text{вх}}$$

където: $Q_{\text{КБ}}$ [kVar] - мощност на КБ, $\tau, \tau_{\text{ср}}, \tau_0$ - температури на диелектрика, околната среда и начална температура, ρ - топлинно съпротивление на КБ, F - околна повърхност на КБ, γ - общ коефициент на претоварване на КБ, зависещ от коефициента на претоварване по ток (γ_I) и по напрежение (γ_U), определени от изразите [9,10].

$$\gamma = \gamma_I \cdot \gamma_U;$$

$$\gamma_I = 1 + \sum_{i=1}^n (v^2 - 1) \cdot (I_v/I_1)^2; \quad (5)$$

$$\gamma_U = 1 + \sum_{i=1}^n (v^2 - 1) \cdot (U_v/U_1)^2$$

Допълнителните разходи от повишените загуби на мощност при наличие на в.х. $Y_{\Delta P_{\text{вх}}}$ имат вероятностен характер и могат да се определят от израза:

$$Y_{\Delta P_{\text{вх}}} = \sum_{P_i=0}^1 Y(t_i) p_i \quad (6)$$

където: $Y(t_i)$ - допълнителни разходи в момента t_i , без отчитане на вероятностния им характер; p_i - вероятност за осъществяване на съответния топлинен режим на КБ, определен като обща вероятност от съвместното съчетаване на параметрите $F, \rho, \text{tg} \delta$ и γ :

$$p_i = p(F) \cdot p(\gamma) \cdot p(\text{tg} \delta) \cdot p(\rho) \quad (7)$$

При включване на КБ в мрежа с в.х. на напрежението, общият ток, консумиран от КБ се увеличава, т.к. реактивното съпротивление на КБ при високите честоти се намалява. Най-често значително претоварване и съществено намаляване надеждността и

живота на КБ се получава при настъпване на токов резонанс при определена честота, като общият ток на КБ може да надхвърли два пъти тока на първия хармоник, а напрежението на шините на ЦП да падне до около 60% от номиналното. Следователно при несинусоидално напрежение на мрежата, КБ увеличават собственото си потребление на реактивна мощност, в резултат на което те дават по-малко повишение на $\cos\phi$, отколкото при синусоидално напрежение. Намаляването на компенсиращата способност на КБ може да се оцени с помощта на изразите [10]:

$$K_P = \sin\delta; K_{P_v} = \frac{\lambda}{\psi} \sin\delta; \quad (8)$$

$$\lambda = \sum_{v=1}^{\infty} v(v_v/v_1)^2;$$

$$\psi = \sqrt{\sum_{v=1}^{\infty} v^2(U_v/U_1)^2}$$

където K_P , K_{P_v} - фактори на мощността при липса и наличие на в.х. в мрежата.

От последният израз следва, че $K_{P_v} < K_P$, т.к. $\psi > \lambda$.

За самите КБ, в.х. са доста опасни, т.к. се увеличават топлинните загуби в тоководещите им елементи вследствие увеличаване на дисперсионната съставляваща на тока, а също така и в диелектрика в резултат на съставлящи на напрежението с високи честоти, което много често води до тяхното аварирание и излизане от строя.

Освен при СТ и КБ, поцеси на стареене на изолацията и намаляване на живота им се наблюдава при електрическите машини (ЕМ), кабелите, проводниците и въздушните линии, като причина за това са необратимите физико - химически процеси, протичащи под въздействието на електрическото поле на в.х, а също и в резултат на повишеното нагряване на тоководещите части на електрическото обзавеждане. Животът на изолацията в електрическите съоръжения при синусоидални t_c и несинусоидални t_{HC} режими може да се определи от изразите [10]:

$$t_c = t_0 \cdot 2^{\frac{\tau_m - \tau_c}{\theta}}; t_{HC} = t_0 \cdot 2^{\frac{\tau_m - \tau_{HC}}{\theta}} \quad (9)$$

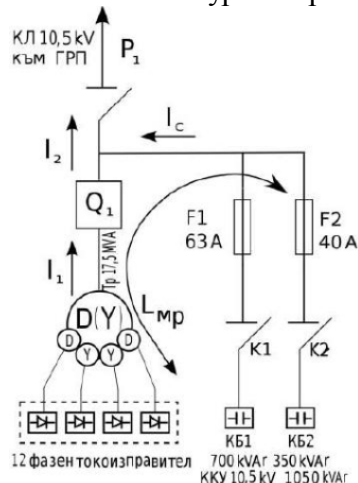
където: t_0 - живот на изолацията при максимална нормирана температура τ_m , τ_c и τ_{HC} - температура на изолацията при продължителен режим на работа на електрообзавеждането при синусоидално и несинусоидално напрежение, θ - температурна константа,

при която живота на изолацията се съкращава два пъти.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Проведено е изследване за установяване влиянието на показателите на качество на електрическата енергия върху надеждността и експлоатационния ресурс на силови елементи от ЕСС на редица промишлени обекти.

Влиянието на изправителите за влошаване на ПКЕЕ, ЕМС и надеждността на електроснабдяването е показателно за ЕСС на ф. Полимери АД. За цех „Електролиза“, захранван по време на експлоатацията на съоръжението до 2013г. от седем СТ с единична мощност 17,5MVA, съществува отношение $85/17,5=4,86$ на мощността на основното захранване ($S_{HTP} = 85MVA$) към мощността на един електролизер. Електролизният процес се съпровожда със сложни явления, като на границата електрод-разтвор, която играе ролята на кондензатор с активно капацитивна проводимост, се генерират в.х. на тока. При 12 фазни науправляеми изправители, електролизът на честотната характеристика се намира между 5 и 13 хармоник на тока и за да се избегне резонанс на напрежението, респективно подобряване на надеждността на съоръженията, е необходимо да се намали мощността на захранващите изправители [10]. Компенсацията на реактивните товари (КРТ) се осъществява с помощта на кондензаторни батерии (КБ) на 10,5 kV (фиг.2). В.х. на напрежението изменят в значителна степен линейния характер на честотните характеристики и е възможно възникване на резонансни явления в L-C контура на мрежата и КБ.



Фиг. 2. КРТ в ЕСС на фирмата

Вероятността от такива явления се засилва и поради факта, че много често аварират диодни групи от изправителите и практически те постоянно работят в силно несиметричен режим, съпроводен от генериране на аномални хармоници на тока. Вследствие на това надеждността на комутационно-защитната апаратура, СТ, кабелите на СН, на самите КБ и останалите силови елементи, рязко се намалява. Дванадесет годишни изследвания в период 1998 ÷ 2010г. показват, че интензивността на отказите $\lambda(t)$ за различните силови елементи в този период се намалява в границите (38÷74)% от регламентиранияте от нормите стойности, като причина за това основно са влошените ПКЕЕ при експлоатацията на съоръженията. През различни етапи на този период, при едни и същи мощности, вследствие ускорени процеси на стареене на изолацията, се наблюдават чести аварии. Извършена е подмяна на близо 9км кабели на 10 kV с нови, ремонтирани и подменени са 4 цехови СТ с мощност 1000 kVA, 3 прекъсвача и 8 разеденителя на 10 и 6 kV, голямо количество КБ на 0,4 и 10 kV с прилежащата комутационна апаратура и др.

За ф. Ле Ко Ко основен консуматор е 100 тонна, 25MW електродъгова пещ (ЕДП). В периода на топене процесът е в силна степен несиметричен и несинусоидален, като са регистрирани както четни, така и нечетни в.х. на тока и напрежението, оценени чрез коефициентите на хармоника K_{v_i} и K_{i_i} [7]. За филтриране на в.х. се използват силови резонансни филтри (СРФ), настроени за работа при пълна мощност – периода на разтапяне на шихтата. Тъй като ДСП работи в режим на понижено натоварване, за който честотния състав на в.х. се изменя в широки граници се наблюдава доста неефективна работа на СРФ. Токовата и напреженовата несиметрия (ϵ_1 и ϵ_U) породени от съставящите с обратна последователност, а също и допълнителните активни загуби породени от пулсиращата и деформационната мощности, като процент от конвенционалните загуби (ΔP_N и ΔP_D), се изменят в доста широки граници (табл. 1).

Табл.1. Изменение на ПКЕЕ за ЕДП-100

$K_{v_U}\%$	$K_{v_i}\%$	$\epsilon_U\%$	$\epsilon_1\%$	$THD_U\%$	$THD_I\%$	$\Delta P_N\%$	$\Delta P_D\%$
K_{v_2} = 5,67	K_{i_2} = 15,31	1,7÷5,2	2,4÷37,2	0,58÷17,42	3,54÷76,9	5÷28 от ΔP_K	10÷35 от ΔP_K
K_{v_3} = 7,42	K_{i_3} = 40,8						
K_{v_5} = 4,62	K_{i_5} = 13,1						

Генерирането на в.х., силно изразената несиметрия на тока и напрежението, респективно пулсиращата и деформационната мощности, натоварват допълнително редица съоръжения в ЕСС на фирмата и създават условия за възникване на аварийни ситуации. Увеличените загуби на мощност предизвикват повишаване на нагриване на изолацията, което води до ускорени физико-химически процеси и рязко съкращаване живота на изолацията на кабелните линии. Само за периода 1994-2001г. вследствие на прегряване и запалване на групово положени кабели по кабелните трасета, се е наложило подмяната на над 14км кабели на СН, което създава аномалии в производствения процес и големи икономически загуби. Повишена аварийност е регистрирана и при комутационно защитните елементи на СН (разеденители, прекъсвачи, токови и напреженови трансформатори и др.).

Аналогични процеси и явления, свързани с понижаване на надеждността на ЕСС вследствие влошаване на ПКЕЕ са наблюдавани в други големи промишлени обекти [8,11,12,13]. Събраният статистически материал дава възможност да се приложат диагностични методи за оценка на нивото на амортизация и остатъчния ресурс на редица електроенергийни съоръжения и ЕСС като цяло. Тъй като тази задача е многопараметрична и изисква комплексно изследване на различни влияещи фактори върху изходни параметри е удачно да се използва инструментариума на Теорията на планиране на експеримента. В основата на този метод стои възможността за едновременно изменение на много фактори и определяне на въздействието им върху съответните изходни параметри. Методът позволява оптимално управление на експеримента с минимален обем средства и постигане на оптимални режими на електропотребление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работата е направен опит да се оцени влиянието на ПКЕЕ върху надеждността на електрическите съоръжения и ЕСС. Анализирани са съвместната работа на редица силови елементи като СТ, КБ, кабелни линии и др. в условията на несиметрично и несинусоидално натоварване. Представени са конкретни резултати, даващи възможност да се установи механизма за въздействие и причините за влошаване на надеждната работа на силовите елементи в ЕСС. Предложен е подход за комплексна оценка, базиран на Теорията на планиране на експеримента, чрез който най-точно и адекватно да се определи влиянието на различни фактори върху надеждността на електроснабдяването.

REFERENCE

- [1] Шидловский А.К., В.Г. Кузнецов, Понишение качества энергии в электрических сетях, Киев. Наукова думка, 1985.
- [2] Илиян Илиев, Въвеждане на интелигентни измервателни системи в България - фактор за подобряване качеството на електрическата енергия, стр.222-228, сборник Енергиен форум НТСЕБ 18-20 юни 2014г.
- [3] Илиян Илиев, Икономическа целесъобразност от въвеждането на интелигентни измервателни системи в България като фактор за подобряване качеството на електрическата енергия, стр.229-235, сборник Енергиен форум НТСЕБ 18-20 юни 2014г.
- [4] Костинский С.С., Результаты статической обработки ΔP_0 и ΔP_k в распределительных СТ, длительно неходящихся в эксплуатации, Известия вузов Электромеханика, 2009, спецвыпуск.
- [5] Шишкин С.А., Оптимизация эксплуатационных параметров СТ 10/0,4 кВ с помощью низковольтных фильтрокомпенсирующих кондензаторных установок, ПЭ, 2005, №5
- [6] Киров Р.М. Постигане на електроенергийна ефективност чрез подобряване качеството на електрическата енергия, Енергиен форум, №9, 10, 2012, ISSN 1313-2962.
- [7] Румен Киров, Валентин Гюров, Илиян Илиев, Николай Найденов, Относно практически възможности за постигане на електроенергийна ефективност и електромагнитна съвместимост при експлоатация на електрически пещи, стр.106-109, Международна научна конференция Унитех 2014, 21-22 ноември ТУ-Габрово.
- [8] Румен Киров, Валентин Гюров, Илиян Илиев, Николай Найденов, Свилен Рачев, Характеристики на електропотреблението в циментовата промишленост, стр.135-138, Международна научна конференция Унитех 2014, 21-22 ноември ТУ-Габрово.
- [9] Румен Киров, Илиян Илиев, Изследване и оптимизация компенсацията на реактивните товари при нелинейно натоварване.стр.59-63,Списание Енергиен форум, брой 15/16, юни 2015г.
- [10] Илиев И.Х., Изследване, анализ и количествена оценка на реалния принос за влошаване на качеството на електрическата енергия от страна на индустриалните потребители и комунално-битовия сектор, Дисертация, Габрово, 2015г.
- [11] Valentin Gyurov, Rumen Kirov, Iljan Iliev, Rosen Vasilev, Proposal for Defining of Some Optimal Parameters in Power Supply Systems of Industrial Branches in the Republic of Bulgaria, eletroenergetika symposium September 12-14, str. 498, Stara lesna, Slovakia.
- [12] Valentin Gyurov, Rumen Kirov, Iljan Iliev, Georgi Georgiev, Study on Possibilities for Improvement of Energy Efficiency of Power Transformers in electric Distribution Networks, eletroenergetika symposium September 12-14, str. 263, Stara lesna, Slovakia.
- [13] Прошков М.А., Илиев И.Х., Гюров В.Н., Киров Р.М., Изследване и анализ на някои енергетични характеристики и показатели на качеството на електрическата енергия в ЕСС на „Каолин“ АД – гр. Сеново, стр.205 сборник Енергиен форум НТСЕБ 26-29 юни 2018г.