ЭЛЕКТРОМЕХАНИК ТИЗИМЛАРДА ТАЪМИНОТ ТАРМОҒИДАГИ КУЧ ЗАНЖИРЛАРИГА ЮҚОРИ ГАРМОНИКАЛАР ТАЪСИРИНИ ТАДҚИҚ ҚИЛИШ

Shavazov Abdulatif Achilovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi, Energetika muammolari instituti, texnika fanlari doktori (DSc), katta ilmiy xodim
ORCID: 0009-0009-8543-9728
E-mail: shavazov@inbox.ru,
Eshqo‘ziyev Xurshid Musajanovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi, Energetika muammolari instituti, texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD),
ORCID: 0009-0008-0924-5449,
E-mail: great93@umail.uz
To’xtaev Bobur
Qarshi davlat texnika universiteti, mustaqil izlanuvchi
E-mail: boburtuhtaev151@gmail.com

Аннотация. Ушбу мақолада синхрон двигателлар, трансформаторлар ҳамда статик конвертерларнинг таъминот тармоғида юзага келувчи юқори гармоникалар таъсири остидаги ҳолати назарий ва амалий жиҳатдан таҳлил қилинади. Юқори гармоникалар манбалари сифатида инверторлар, кучли импульсли ёки нотенг юкламалар, ҳамда рекфикаторлар мисолида қаралади. Бундан ташқари юқори тартиб гармоникаларнинг двигателлар моменти ва токи тебранишларига, иловий иссиқлик йўқотишларига ва тизимнинг электр сифат кўрсаткичларига таъсири маълумотлар, формулалар, жадвал ва графиклар асосида ёритилади. Таъминот тармоғи ва электромеханик юк ўртасидаги ўзаро боғланиш блок-схемалар ва энергия оқими схемалари ёрдамида кўрсатилади. Мақола якунида таҳлил хулосалари келтирилиб, юқори гармоникаларнинг салбий таъсирларини камайтириш бўйича қисқача тавсиялар ишлаб чиқилган.

Калит сўзлар: Синхрон двигател, трансформатор, инвертор, ток, кучланиш, гармоника, резонанс, пуск, изолясия, ҳарорат, частота, кабел, транзистор, компенсатор, фаза.

Аннотация. В данной статье теоретически и практически анализируется состояние синхронных двигателей, трансформаторов и статических преобразователей под воздействием высших гармоник, возникающих в сети электроснабжения. В качестве источников высших гармоник рассматриваются инверторы, мощные импульсные или неравномерные нагрузки, а также выпрямители. Кроме того, влияние гармоник высшего порядка на колебания момента и тока двигателей, дополнительные тепловые

ISSN 3030-3907

потери и показатели качества электроэнергии системы освещается на основе данных, формул, таблиц и графиков. Взаимосвязь между питающей сетью и электромеханической нагрузкой иллюстрируется с помощью блок-схем и схем потока энергии. В заключении статьи представлены выводы анализа и разработаны краткие рекомендации по снижению негативного воздействия высших гармоник.

Ключевые слова: Синхронный двигатель, трансформатор, инвертор, ток, напряжение, гармоника, резонанс, пуск, изоляция, температура, частота, кабель, транзистор, компенсатор, фаза.

Abstract. This article theoretically and practically analyzes the effects of higher harmonics in the power supply network on synchronous motors, transformers, and static converters. Inverters, high-impulse or unbalanced loads, and rectifiers are examined as sources of higher harmonics. Additionally, the influence of higher-order harmonics on motor torque and current fluctuations, additional heat losses, and electrical quality indicators of the system is illustrated using data, formulas, tables, and graphs. The interaction between the power supply network and the electromechanical load is demonstrated through block diagrams and energy flow schematics. The article concludes with an analysis summary and brief recommendations for mitigating the negative effects of higher harmonics.

Keywords: Synchronous motor, transformer, inverter, current, voltage, harmonic, resonance, starting, insulation, temperature, frequency, cable, transistor, compensator, phase.

Кириш.

Электр таъминоти тармоқларида кучланиш ва ток синусоид шаклда бўлиши идеал ҳолат ҳисобланади. Бироқ замонавий саноат ва маиший юкламаларнинг кўпчилиги носинусоидал характерга эга бўлиб, улар таъминот тармоғига юқори тартибли гармоник бузилишлар киритади[1-2]. Юқори гармоникалар деганда, асосий частотанинг бутун сонли бўлган частотали сигнал компонентлари назарда тутилади (масалан, 50 Гц учун 3-гармоника 150 Гц, 5-гармоника 250 Гц ва ҳ.к.) [3-4]. Натижада тармоқдаги ток ва кучланиш тўлқин шакллари бузилади, яъни уларда қўшимча гармоник компонентлар пайдо бўлади. Бу ҳолат электр энергия сифатининг пасайишига олиб келади ва электромеханик ускуналарнинг ишлаш самарадорлигига салбий таъсир кўрсатади.

Илмий манбаларда келтирилишича, жаҳонда электр юкламаларининг тахминан 60% қисми электродвигателларга тўғри келади ва уларнинг 90% дан зиёди уч фазали индукцион моторлардир [5]. Ушбу моторлар ва уларга уланадиган трансформатор ҳамда конвертер ускуналари идеал синусоид электр таъминоти шароитига мўлжалланган бўлади. Амалий тармоқларда эса

ISSN 3030-3907

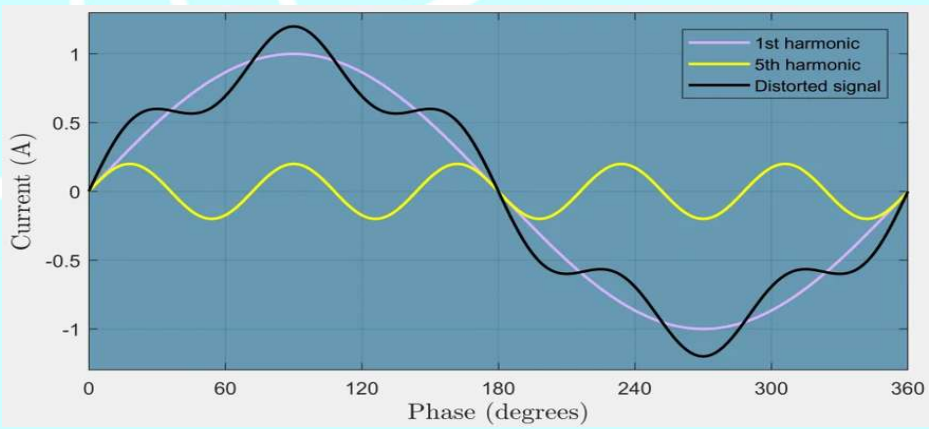
турли инверторлар, ректификаторлар, пульслаш режимидаги юкламалар каби нолиней манбалар туфайли юқори гармоникалар доимо мавжуд бўлиб, моторлар, трансформаторлар каби қурилмаларда қўшимча йўқотишлар, қизиб кетиш ва тебранишлар пайдо бўлиши мумкин [6-7]. Шу боис, электромеханик тизимларда юқори гармоникалар таъсирини ўрганиш жуда муҳим ҳисобланади.

Усуллар ва материаллар. Фурье таҳлили ва гармоникалар тартиби бўйича ҳар қандай даврий ток ёки кучланиш сигнали фурье қаторлари ёрдамида асосий частота ва ундан юқори бутун сонли тартиблардаги гармоник компонентлар йиғиндиси сифатида тасвирланиши мумкин. Масалан, вақт бўйича f(t) даврий сигнал учун қуйидаги қатор ёзилиши мумкин:

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty}\left(A_h\cos(h\omega_0 t) + B_h\sin(h\omega_0 t)\right), \qquad (1)$$

Бу ерда: $h\omega_0 = f(t)$ асосий давр частотаси (50 ёки 60 Гц), h – гармоника тартиби (1 – асосий, 2 – иккинчи гармоника, ва ҳ.к.).

Нолиней юкламалар ток ва кучланиш тўлқинларини синусоид шаклдан ўзгартирар экан, уларнинг Фурье спектрида юқори тартибли h>1 гармоникалар пайдо бўлади[8]. Қуйида келтирилган 1-расмда 50 Гц асосий сигналга 5-тартиб гармоника қўшилганда тўлқин шакли қандай бузилиши кўрсатилган.



1-расм. Асосий 1-гармоника ва 5-гармоника йиғиндисида ҳосил бўлган бузилган ток тўлқини.

Бу ерда 5-гармоник тезлиги асосий тезликдан 5 марта юқори бўлиб, бир асосий давр мобайнида 5-та тўлқин якунланади[9]. Натижавий тўлқин эса бир марталик юқори қиррали бузилишга эга синусоид кўринишида бўлади.

Ечим. Электр сигналларида гармоникалар даражасини кузатиш учун “Total Harmonic Distortion (THD)” кўрсаткичи кенг қўлланилади. THD сигналдаги юқори гармоник компонентлар энергиясининг асосий гармоникага нисбатан улушини фоизда ифодалайди. Масалан, кучланиш бўйича THD қуйидаги формула орқали аниқланади:

ISSN 3030-3907

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2+V_3^2+\cdots+V_n^2}}{V_1} \times 100\%, \quad (2)$$

Бу ерда:

V_1 – асосий (биринчи) гармониканинг эффектив қиймати,

V_2^2, V_3^2, V_n^2 – 2-тартиб, 3-тартиб ва ҳ.к. гармоника таъсир қийматлари.

Худди шу тарзда ток учун THD_V ҳисобланади. THD қиймати қанча катта бўлса, сигнал шунча кўп бузилганини билдиради [10]. Масалан, электр тармоқлари учун қабул қилинган меъёрлар бўйича юқори кучланишли тармоқларда THD 5% дан ошмаслиги тавсия этилади [11]. Агар THD меъёрдан ортиқ бўлса, бу ҳолат электр ускуналарига зиён етказувчи юқори гармоник таъсирлар борлигидан далолат беради.

Гармоник импеданс ва резонанс: Таъминот тармоғи ҳар бир гармоник частотада ўз импедансига эга бўлиб, бу импеданс гармоник токлар оқимига қарши реакция кўрсатади. Масалан, индуктив тармоқ элементи трансформаторнинг реактив қаршилиги

$$X_L = \omega L = 2\pi f \cdot L \quad (3)$$

Бу ерда:

X_L— реактив индуктив қаршилик,

$\omega = 2\pi f$— айланма частота,

L— индуктивлик.

Гармоника тартибига кўра бу қаршилик ортади (частотага пропорционал). Шу сабабли юқори частотали гармоник токлар тармоқда кўпроқ кучланиш тушишини келтириб чиқаради. Буни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$X_{L,h} = h \cdot X_{L,1} \quad (4)$$

Бу ерда: h— гармоник тартиби (масалан, 3, 5, 7 ...), $X_{L,1}$— биринчи (асосий) гармоникадаги реактив қаршилик.

Ом қонуни гармоник учун

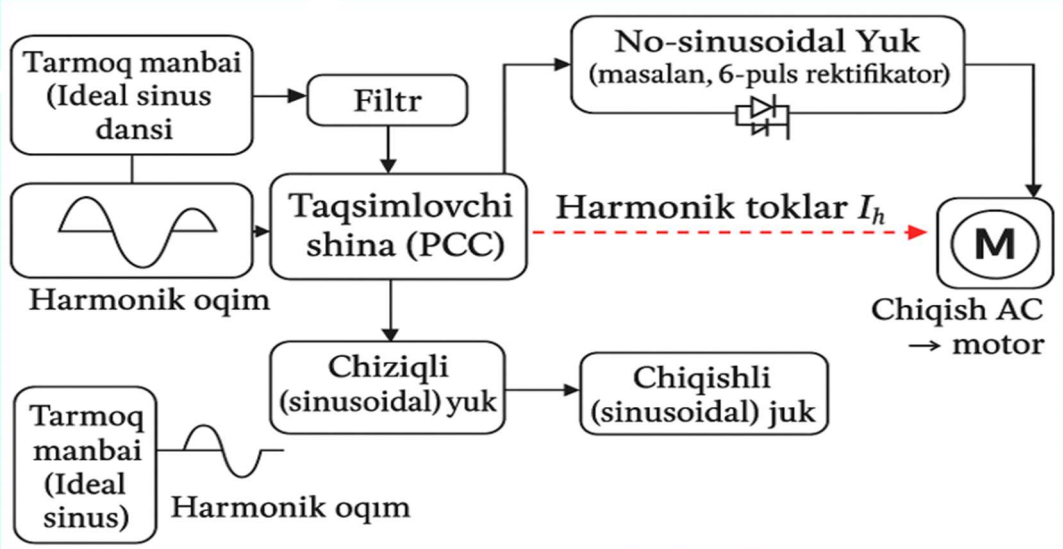
$$U_h = I_h \cdot Z_h$$

Ом қонуни – яъни U_h, гармоника токи I_h, тармоқ импеданси Z_h, орқали U_h—h гармоник кучланиш тушиши ҳосил қилади [8-9]. Натижада тармоқнинг шу нуқтасида (масалан, трансформатордан кейинги шинада) кучланиш шакли ҳам бузилади ва шу шинага уланган бошқа барча юкламалар бузилган гармоникалари бор кучланиш билан ишлайди[10-11]. Гармоник ток манбалари ва тармоқ параметрларига боғлиқ ҳолда, маълум бир частотада тармоқда параллель ёки тартиб резонанси ҳам пайдо бўлиши мумкин. Хусусан, компенсация конденсаторлари қўйилган тармоқларда индуктив ва сиғимли қаршиликлар муайян гармоника частотасига тенглашиб кетса, резонанс натижасида айрим гармоникаларнинг кучланиши ва токи кескин

ISSN 3030-3907

ошиб кетиши эҳтимоли бор [10-11]. Шунинг учун тармоқнинг ҳар бир гармоникадаги импеданс хусусиятларини (масалан, Z_hни частота функцияси сифатида) таҳлил қилиш ва керак бўлса, фильтрлар ёрдамида резонанс частотасини силжитиш муҳимдир.

Юқори гармоникалар асосан юк томондаги нолиней қурилмалардан пайдо бўлиб, тармоқ томон юқорига оқади – яъни манба томон юқори частотали токлар кириб боради ва умумий шинада йиғилиб, тармоқни ифлослайди[10]. 2-расмда нолиней юклама уланган тармоқнинг соддалаштирилган тизими тасвирланган. Унда инвертор (6-пульс ректфикатор)ли бошқариладиган электрдвигатель юкламаси тармоқ трансформаторидан таъминлаётган ҳолда кўрсатилган. Нолиней юклама ўзининг асосий токидан ташқари гармоник токларни ҳам тармоқ шинасига узатади ва бу токлар тармоқ трансформатори орқали манба томонга қайтиб, бошқа параллел уланган юкламаларга ҳам таъсир кўрсатади. Бошқа томондан, манба (генератор)нинг ўз импеданси кичик бўлса ҳам, у юқори гармоник токларни ўтказганда кичик миқдорда бўлсада гармоник кучланиш бузилишини келтириб чиқаради [10-11]. Шу боис, юқори гармоникаларни камайтириш учун тармоқдаги барча юкламаларнинг умумий ҳиссасини ҳисобга олиш зарур – яъни бир неча нолиней юкламалардан келувчи бир хил тартибли гармоник токлар фазасига кўра қисман ўзаро сўндирилиши ҳам мумкин, лекин умумий ҳолда шинадаги гармоник ифлосланиш барибир маълум даражада қолади [11].



2-расм. Таъминот тармоғида нолиней юклама уланган тизимни соддалаштирилган блок-схемаси.

Нолиней юклама тарқатаётган гармоник токларнинг тармоққа юқорилаб оқишини кўрсатмоқда. Бундай гармоник токлар умумий шинада қўшилиб, тармоқ импеданси орқали гармоник кучланиш бузилишига сабаб бўлади[14,18].

ISSN 3030-3907

Шу тариқа, юқори гармоникалар манбаи бўлган конвертер ёки синусоид юкламалар фақат ўзларинигина эмас, тармоққа уланган бошқа электромеханик қурилмаларни ҳам зарарли гармоник таъсир остига қўяди. Қуйида шу таъсирларнинг асосий кўринишлари ва оқибатлари турли қурилмалар мисолида кўриб чиқилади.

юқори гармоникаларнинг электромеханик тизимларга таъсири;

индукцион ва синхрон двигателларга таъсири.

Индукцион (асинхрон) ва синхрон электродвигателлар тармоқ гармоник бузилишларига нисбатан сезувчан бўлиб, уларда бир нечта нохуш ҳолатларни келтириб чиқаради.

Юқори гармоник частотали кучланиш ва ток компонентлари двигател статори ва роторида қўшимча юкланишларни ҳосил қилади. Статор обмоткаларида юқори частотали токлар оқиб, обмотка каршилигида қўшимча мис йўқотишлари юзага келади. Роторда эса индукцион машиналарда 5-, 7- ва бошқа гармоник магнит майдонлар қўшимча токлар индукциялаб, ротор ўтказгичларида қўшимча йўқотиш ва иссиқликка сабаб бўлади [11]. Шунингдек, ўзгарувчан магнит оқими юқори частоталарда тез-қайта магнитланишни юзага келтириб, двигател статоридаги пўлат материалда гистерезис ва ортиқча ток йўқотишларини оширади. Бу йўқотишлар частотанинг квадрат функцияси бўйича ортади, яъни гармоник частота неча марта юқори бўлса, шунча маротаба кўпроқ йўқотиш ва қизиш пайдо қилади [11-12]. Масалан, 5-гармоника кичик улушда бўлса-да, 300 Гц частотаси туфайли трансформатор ёки мотор статорида анча юқори иссиқлик чиқаради. Натижада двигателнинг умумий иссиқлик чиқариши ортади ва юқори ҳарорат изоляция материалларини тез эскиради, двигатель хизмат муддати қисқаради [12]. Тадқиқотларда аниқланганки, машина изоляцияси ҳароратининг ҳар 10°C ошиши унинг ишлаш муддатини икки бараваргача камайтиради [12].

Гармоник ток ва магнит майдонлар моторда бир неча хил частотали электромагнит момент ўзгаришларини келтириб чиқаради. Уч фазали двигател статоридаги 5-тартиб гармоника токлари тезлиги асосий майдонга нисбатан тескари йўналишда айланувчи магнит майдонини ҳосил қилади (бу манфий тартибли гармоника ҳисобланади). Натижада ушбу майдон роторда асосий айланишга тескари йўналган тормозловчи момент пайдо қилади. Катта амплитудали 5-гармоникалар мотор юкланишини ошириб, унинг айланишини секинлаштиради ёки тебратиши мумкин [12]. Шунингдек, 7-гармоника каби мусбат тартибли гармоникалар асосий майдон йўналишида (лекин 7 марта тезроқ) айланувчи юқори тезликдаги майдон ҳосил қилгани учун роторда силкувчи тартибдаги пульсацияли момент пайдо қилади [13].

ISSN 3030-3907

Гармоник токлар ўз моҳиятига кўра тармоқда қўшимча реактив кучланиш тушишларини келтиради. Натижада фойдали фундаментал токга нисбатан реактив ток улуши ортади ва умумий қувват коэффициенти пасаяди [13]. Моторда гармоникалар туфайли PF пасайиши двигательнинг фойдали ишчи қувватидан ташқари ток ортиб кетганини билдиради. Бу ҳолат тармоқни ортча юклайди ва компенсацияловчи қурилмалар талабини оширади [13].

Агар мотор тармоғи ва унга уланган конденсаторлар тизими маълум бир гармоника частотасида параллель резонанс шароитига тушса, двигательда ва унинг таъминот чизиқларида кучланиш ва токнинг катта амплитудали тебранишлари юзага келиши мумкин. Бундай ҳолда мотор ва таъминлаш тизими ўртасида кучланиш барқарорсизлиги пайдо бўлиб, двигателнинг носозликларигача олиб бориши мумкин. Шунинг учун двигателларнинг ишлаш шароитида тармоқ гармоник ҳолатини ҳам инобатга олиб, зарур бўлса, фильтрлар ёки махсус чоралар билан резонансдан сақланиш даркор [13].

Юқоридаги таъсирларнинг барчаси индукцион ва синхрон двигателларда маълум даражада кузатилади. Синхрон машина роторида юқори гармоник токлар двигатель чўлғамларида айланма токларни пайдо қилиб, қўшимча қиздириши мумкин [13]. Шу сабабли юқори қувватли синхрон генератор ва двигательларда гармоникларга қарши демпфер чўлғамлари назарда тутилган бўлади.

Гармоникалар таъсирида двигателлар иссиқлиги ортгани боис уларни тўла юкда ишлатиб бўлмайди. Яъни, гармоник ифлосланган тармоқда двигатель номинал қувватидан кичикроқ юкланади, акс ҳолда изоляция ҳарорати меъёрдан ошиб кетиши мумкин[34-35]. Масалан, бир тадқиқотда тармоқдаги 3-гармоник кучланиш натижасида двигательда умумий йўқотишлар 8% га, 5-гармоникада 3% га ошиши аниқланган (бошқа гармоникалар эса нисбатан кичик таъсир кўрсатган) [13]. Қуйида келтирилган 1-жадвалда шу маълумотлар келтириб ўтилган.

Юқори гармоникаларнинг индукцион двигатель йўқотишларига қўшган улуши

1-жадвал.

Ҳармоника тартиби	Йўқотишлар улуши (асосийга нисбатан)
3-гармоника	~8%
5-гармоника	~3%

Юқоридаги рақамлардан кўриниб турибдики, кучланиш гармоникалари кичик фоизларда бўлса-да, двигательда қўшимча йўқотишларни ҳосил қилиши мумкин. Агар тармоқда THD жуда катта бўлса

ISSN 3030-3907

(масалан, 10–15% дан ортиқ), двигательларнинг чиқиш қувватидан ~10–20% дерейтинг қўллаш тавсия этилади [14-15]. Шунингдек, амалиётда гармоникларнинг айрим тартиблари учун фойдали коэффициентлар жорий этилиб, WHD (Weighted Harmonic Distortion) каби кўрсаткичлар ҳам қўлланилмоқда – чунки THD умумий сонини беради.

Тармоқдаги трансформаторлар ҳам юқори гармоникалар таъсиридан четда қолмайди. Асосан, гармоник токлар трансформаторда қуйидаги муаммоларни келтириб чиқаради:

Юқори гармоник токлар трансформатор чўлғамларида юқори частотали кўринишдаги токлар бўлади. Бу токлар ўтказгич кесими бўйлаб бир текис тақсимланмай, асосан сирт қисмдан оқади ва самарали қаршиликни оширади [14]. Шунингдек, трансформатор ядросида тез магнитланиш ўзгаришлари ҳар бир гармоника учун гистерезис йўқотишларини ортишига олиб келади [14].

Агар трансформатор юлдуз (Y) уланишдаги нейтрал симга эга бўлса, уч каррали (3, 9, 15-...) тартибли гармоник токлар фазаларда йиғилиб нейтрал сим орқали қайтишга интилади[14]. Бундай гармоник токлар ҳар бир фазада бир хил фазада бўлиб, нейтралда улар қўшилиб кетади. Натижада нейтрал сим орқали юрган ток номиналдан анча ошиши ва симнинг қизиб кетиши мумкин [15]. Агар нейтралнинг юкланиши меъёрдан ортиқ бўлса, унинг изоляцияси эриши, ҳатто ёнғин хавфи туғилиши мумкин.

Натижа. Юқори гармоник токлар кабелларда ҳам қўшимча жиҳатдан қизишга олиб келади. Гармоник юкламали тармоқларда кабел кесимларини бевосита ҳисобдагига нисбатан 10–20%га каттароқ танлаш тавсия этилади. Шунингдек, автомат ўчиргич, сақлагич каби ҳимоя ускуналари орқали юрган юқори частотали токлар уларнинг ҳам қизиши ва тезроқ ишга тушишига сабаб бўлиши мумкин. Конденсатор батареялари эса юқори гармоник токларни “ўзига тортиб” юбориши туфайли юклама ҳолатига тушади.

Статик конвертерлар (масалан, тиристорли ректфикаторлар, транзисторли инверторлар, статик VAR компенсаторлар ва бошқ.)нинг ўзи юқори гармоник ток-кучланиш манбаи бўлгани ҳолда, уларнинг ишлаш сифатини ҳам тармоқ гармоникалари таъсир этади. Масалан, 6-пульс ректфикатор ўз характерига кўра тармоққа 5-, 7-, 11-, 13-тартибли ток гармоникаларини юборади [15]. Агар тармоқда бир нечта бундай конвертерлар бўлса, улардан чиққан бир хил тартибли гармоникалар шинада қўшилиб кетиб, умумий THDни оширади. Қолаверса, тармоқ импеданси катта бўлса (масалан, юклама генератор орқали таъминланаётган бўлса), бир хил гармоник токлар янада катта кучланиш бузилишини келтириши мумкин – масалан, генератор импеданси одатда тармоқ трансформаторникидан 3-4

ISSN 3030-3907

баробар юқори бўлгани сабаб, бир хил гармоник ток манба тармоғида 3-4 баробар ортиб кўринади [16]. Статик конвертерларнинг ўзлари эса таъминот кучланишининг гармоник бузилишига сезувчан: агар конвертер кириш кучланишида камчилик бўлса, унинг бошқарув алгоритми издан чиқиши, мисол учун, фазалар бўйича нотенг ҳосил бўлиши мумкин.

Статик конвертер ва юклама ўртасидаги энергия оқимида ҳам юқори гармоникаларда айрим ўзгаришлар бўлади. Масалан, PWM инвертор моторга берилувчи кучланишни юқори частотали импульслар орқали шакллантиради. Мотор токи фильтрлар ёрдамида маълум даражада юмшатилса-да, айрим юқори частотали ток пульсациялари моторда бўлади ва юқорида кўрсатилган қўшимча йўқотишларга сабаб бўлади [17]. Замонавий кўп импульсли (12, 18-пульс) ва мультилевел (кўп поғонали) инверторлар яхшироқ спектрал сифатга эга бўлиб, моторларда гармоник тибраниш ва қизишларни камайтиради [18]. Худди шу тарзда, статик конвертерлар трансформатор орқали тармоққа уланганда, икки ёки уч қайтарушли схемалар орқали асосий гармоникаларни ўз ичида бекор қилиб, тармоққа чиқармайди.

Хулоса. Юқори гармоникаларнинг электромеханик тизимларга таъсири мураккаб ва салбий бўлиб, уни инкор этиб бўлмайди. Юклама тармоқдаги инвертор, ректфикатор каби нолиней қурилмалар сабаб сигналлар идеал синусоиддан четлашса, бу четлашиш (гармоник бузилиш) двигателларда қўшимча қизиш ва тебранишлар, трансформаторларда иссиқлик йўқотишлари ва нейтрал юки ошиши, кабел ва конденсаторларда ортирма зўриқишлар шаклида намоён бўлади. Назарий таҳлил ва кўрсатилган мисоллардан кўринишича, ҳатто 5–10% атрофидаги гармоник бузилишлар узоқ муддатда ускуналар изоляцияси ва механик қисмига путур етказиши мумкин. Шу сабабли, электр таъминоти тизимларида гармоникалар даражасини назорат қилиш ва меъёрий чекланмалардан оширмаслик жуда муҳимдир.

Замонавий йирик электрюритмалар ва UPSлар кўпинча ўзлари юқори гармоникларни чеклаш ёки фильтрлаш функцияларига эга. Аммо барибир тармоқ умумий нуқтасида THD ни назорат қилиш лозим – халқаро стандартларга биноан юқори кучланишли тармоқларда THD(V)<5%, паст кучланишли тармоқларда <8% таъминланиши керак. Агар корхона электр тармоғи “ифлос” бўлса (THD меъёрдан юқори) ва бу ҳолатни ўзгартириб бўлмаса, унга уланган электромеханик ускуналарни ҳам қайта лойиҳалаш талаб этилади.

ФОЙДАЛАНИЛГАН АДАБИЁТЛАР

1. Камалов Т.С., Ишназаров О.Х., Шавазов А.А. Водосберегающая и энергосберегающая технологии насосных станций систем машинного

ISSN 3030-3907

орошения. // Монография, – Ташкент Монография. ISBN: 978-9910-9269-1-4 ©Издательство ООО “Impress Media”, 2023 - 194 с.
2. Камалов Т.С., Шавазов А.А., Тухтаев Б.Б. Машинали суғориш тизими насос станцияларининг иш режимларини тизимли таҳлил қилиш// Проблемы информатики и энергетики. – Ташкент, 2021 № 2, Б. 57-64.
3. Шавазов А.А., Эшкузиев Х.М., Зохидов И.З. Частотавий ростланувчи асинхрон электрюритмаларнинг насос станциялари билан ўзаро боғлиқ тизимлари // Фарғона политехника институти, Илмий-техника журнали, 2023, спецвыпуск №15, 99-105 b.
4. Ishnazarov O.X., Shavazov A.A., Eshqo‘ziyev X.M. “Yirik sugo‘rish nasos stansiyalarida sinxron elektr yuritmalarining chastotaviy boshqarish tizimi” Fan va texnologiyalar taraqqiyoti ilmiy texnikaviy jurnal №2 2024 son. Buxoro 58-64 betlar.
5. А.А. Шавазов, Ишанова Д. А. // Частотное управление асинхронного двигателя в замкнутой системе при непостоянной нагрузке. // «Zamonaviy dunyoda ilm-fan va texnologiya» nomli ilmiy-amaliy konferensiya. // https://doi.org/10.5281/zenodo.7151691.
6. А.А. Шавазов, О.Х. Ишназаров. // Частотное управление электропривода и его влияние на электрические сети. //Международной научно практической конференции «Актуалные проблемы энергетики в условиях цифровизации экономики», 24-26 ноября 2022 года Бухара
7. Kamalov T., Isakov A., Shavazov A., Tukhtamishev B., Elmuratova A. Calculation of specific rates of the electric energy consumption at frequency regulation of electric drives: A case study of pumping stations// Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, 14-16 October 2021. -Tashkent, Uzbekistan, 2021. (Scopus).
8. Isakov A., Shavazov A., Ismailova Z., Rakhmankulova B. Frequency control of asynchronous motor for an irrigation pump of machine irrigation systems. E3S Web of Conferences 402,10004 (2023).
9. https://www.eaton.com/us/en-us/products/controls-drives-automation-sensors/harmonics/harmonics-faq-video-library/what-is-the-ohms-law-explanation-for-harmonics.html
10. https://www.electrical-installation.org/enwiki/Origin_of_harmonics
11. https://www.maddox.com/resources/articles/guide-to-transformer-harmonics-and-k-factor
12. Harmonics Explained - Power Converters. https://power-converters.net/5th-harmonics-explained.
13. Microsoft Word - paper on harmonic effects01.doc. https://www.wseas.us/e-library/conferences/2005prague/papers/493-139.pdf.

ISSN 3030-3907

14. Harmonics in Synchronous Motors: Causes, Effects, and Mitigation https://mechtex.com/blog/harmonics-in-synchronous-motors-causes-effects-and-mitigation
15. How bad harmonics influence the work of motors and generators, transformers, capacitors etc. EEPhttps://electrical-engineering-portal.com/harmonics-influence
16. acim.nidec.com.https://acim.nidec.com/drives/control-techniques/-/media/controltechniques/documents/en-us/whp_harmonicmitigation.pdfCurrent Harmonic - an overview ScienceDirect Topics. https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/current-harmonic
17. Thermal Behavior Improvement in Induction Motors Using a Pulse. https://www.mdpi.com/2075-1702/13/8/703
18. Harmonic Distortion and Variable Frequency Drives: Definitions |PDF| Inductor Rectifier. https://www.scribd.com/document/403473003/Harmonics

ISSN 3030-3907