



КОЕФИЦИЕНТ НА ПОЛЕЗНО ДЕЙСТВИЕ НА ТЯГОВА МРЕЖА ЗА ПРОМЕНЛИВ ТОК В ЕДНОПЪТЕН УЧАСТЪК

Петър МАТОВ, Александър ВЕЦКОВ

matov@tu-sofia.bg, alex_veckov@abv.bg

Петър Матов, доцент, д-р, Александър Вецков, инж. Технически университет - София,

НК"Железопътна инфраструктура" - София

БЪЛГАРИЯ

Резюме: Загубите на активна мощност и енергия в тяговите мрежи за променлив ток предизвикват по-малко внимание отколкото загубите на напрежение както на етап проектиране на електрифициран ж.п. участък, така и по време на експлоатация. Тук са показани изчислени и измерени стойности за коефициента на полезно действие на такива мрежи, с които се потвърждава слабото количествено участие на активните загуби в общата тягова електроенергия.

Ключови думи: електрификация, контактни мрежи, електроенергия, коефициент на полезно действие.

ВЪВЕДЕНИЕ

Тяговата мрежа се състои от захранващи фидери, контактна мрежа, усилващи и обратни проводници, релси, земя и обратни фидери. Импедансът $Z [\Omega]$ на тяговата мрежа се определя основно от проводниците на контактната мрежа - от материалите, сеченията, разстоянията им до релсите и дължината на участъка $l [km]$. Фидерите са къси в сравнение с дължината на контактната мрежа в открит път и тяхното участие в импеданса обикновено се пренебрегва. Така се приема, че той е приблизително пропорционален на дължината

$$Z = z_0 * l, \quad (1)$$

където

$$z_0 = r + jx \quad [\Omega/km] \quad (2)$$

е специфичен импеданс.

При протичане на тягов ток I се получават загуби на напрежение и енергия, които зависят от големината и съставките r и x на специфичния импеданс на тяговата мрежа. Формата и хармоничният състав на тяговия

ток се определят от принципа на действие и режимите на локомотивните токоизправители. От своя страна формата на тока също оказва влияние на еквивалентния импеданс - висшите хармоници на несинусоидалния ток увеличават индуктивната съставка един път чрез повишената си честота и втори път - чрез преразпределение на тока между паралелно свързаните носещи въжета, контактни и усилващи проводници. Преразпределението на тока променя и участието на активната съставка на импеданса. Токовото отместване в плътната стомана на релсите увеличава активното им съпротивление. Още по-сложно е разпределението на токовете в тягови мрежи на двупътни участъци с и без ток по съседния път, а също така и при наличие на обратни проводници, свързани с релсите. От една страна сложността се дължи на увеличавения брой проводници, а от друга - на взаимно индуктивната връзка между мрежите на двата пътя. Понижаването на напрежението до стойност $U - \Delta U$ в тяговите мрежи е

допустимо в определени граници - БДС EN 50163 и [1].

ПРОБЛЕМ

Енергийните загуби ΔP_e в тяговата мрежа не са нормирани, но е естествено да се предпочитат тази, в която те са по-малки. Загубите на активна енергия са пропорционални на времето t , активната съставка R на импеданса и квадрата на ефективната стойност на протичащия ток I :

$$\Delta P_e = I^2 R t. \quad (3)$$

Показател за качеството на тяговата мрежа от енергийна гледна точка е нейният коефициент на полезно действие. По принцип КПД се изчислява чрез отношението на консумираната $P_e - \Delta P_e$ и подадената активна енергия P_e (или мощност):

$$\eta_{ETM} = \frac{(UI \cos \varphi)t - \Delta P_e}{(UI \cos \varphi)t} = \frac{UI \cos \varphi - I^2 R}{UI \cos \varphi} \quad (4)$$

където φ е дефазирание между напрежението U и тока I .

Изразът (4) онагледява известни истини, а именно загубите при пренасяне на електроенергия са толкова по-малки, колкото е по-високо напрежението и по-малки дефазиранието и активното съпротивление. При несинусоидални ток и напрежение общата активна мощност се получава от сумата от активните мощности предавани от всеки хармоник:

$$P = \sum_{i=1}^{\infty} U_i I_i \cos \varphi_i, \quad (5)$$

Несинусоидалният ток има ефективна стойност, изчислена чрез квадрата на ефективната стойност на всеки хармоник:

$$I = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} I_i^2}. \quad (6)$$

При движение локомотивът (локомотивите) работят в различни режими - тяга, движение по инерция, рекуперация и спиране. Необходимата мощност се променя в зависимост от масата на влака, съпротивленията на движение, скоростите и наклоните. Загубата на енергия ΔP_e се определя както от текущите моментни стойности i на тока, така и от променящата се активна съставка $R(x)$ на импеданса на мрежата с дължина x (от локомотива - до подстанцията):

$$\Delta P_e = \int_0^T i^2(t) R(x) dt \quad (7)$$

Разстоянието x също е функция на времето t , ограниченията на скоростта и броя спирания/тръгвания за времето T на преминаване на участъка.

Загубата на активна мощност зависи от разстоянието от локомотива до подстанцията - при $x=0$ загубите са нулеви и растат до максимална стойност при локомотив намиращ се в края на фидерната зона.

В случай с n на брой локомотиви, първият на разстояние x_1 и ток i_1 , а останалите намиращи се на различно разстояние x_j помежду си и с токове i_j във всеки отрязък от контактната мрежа между тях, изразът (7) се променя:

$$\Delta P_e = \int_0^T \left[i_1^2(t) R(x_1) + \sum_{j=2}^n i_j^2(t) R(x_j) \right] dt. \quad (8)$$

След тези пояснения, за сложно натоварена мрежа с общ ток $i = i_1 + \sum_{j=2}^n i_j$, интегралният КПД се представя по следния начин:

$$\eta_{ETM} = \frac{\int_0^T u(t)i(t)dt - \int_0^T \left[i_1^2(t) R(x_1) + \sum_{j=2}^n i_j^2(t) R(x_j) \right] dt}{\int_0^T u(t)i(t)dt} \quad (9)$$

Изразът (9) не може да се реши аналитично за практическите случаи с реални участъци и субективен фактор от страна на j на брой локомотивни машинисти. По тази причина не е възможно да се получи изчислителна формула за интегралния коефициент на полезно действие на тяговата мрежа при извършване на определено количество работа. Очевидно е само, че моментната му максимална стойност е $\eta_{max} = 1$ при $x \Rightarrow 0$, т.е. без тягова мрежа, а минималната е при $i = i_1 = i_j$ и $x = x_1 = x_j = x_{max}$, когато всички локомотиви са в края на захранвания участък.

РЕШЕНИЯ

ИЗЧИСЛИТЕЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Минималната моментна стойност на кпд може да се определи приблизително чрез мощностите. Така например, с допустим по температурни ограничения на контактната мрежа ток $I=500\text{ A}$, с номинално напрежение 25000 V и без дефазирание помежду им, в участък с дължина 25 km и активна съставка на импеданса $0,2\ \Omega/\text{km}$, най-малкият кпд, съгласно (4), е

$$\eta_{\min} = \frac{UI \cos \varphi - I^2 R_{\max}}{UI \cos \varphi} =$$

$$= \frac{25000\text{ V} \cdot 500\text{ A} \cdot \cos 0^\circ - (500\text{ A})^2 \cdot 0,2\ \Omega / \text{km} \cdot 25\text{ km}}{25000\text{ V} \cdot 500\text{ A} \cdot \cos 0^\circ} =$$

$$= \frac{12,5\text{ MW} - 1,25\text{ MW}}{12,5\text{ MW}} = \frac{11,25\text{ MW}}{12,5\text{ MW}} = 0,900.$$

При същите условия, но с по-малък ток ($I=100\text{ A}$), за минималния кпд се получава

$$\eta_{\min} =$$

$$= \frac{25000\text{ V} \cdot 100\text{ A} \cdot \cos 0^\circ - (100\text{ A})^2 \cdot 0,2\ \Omega / \text{km} \cdot 25\text{ km}}{25000\text{ V} \cdot 100\text{ A} \cdot \cos 0^\circ} =$$

$$= \frac{2,5\text{ MW} - 0,05\text{ MW}}{2,5\text{ MW}} = \frac{2,45\text{ MW}}{2,5\text{ MW}} = 0,980.$$

Премаването на целия участък с константен ток с големина 500 A и постоянна скорост ще интегрира един среден кпд. Големината му се получава от средно аритметичната стойност на двете крайни -

$$\eta = (\eta_{\max} + \eta_{\min})/2 = (1 + 0,900)/2 = 0,950.$$

Трите числа $1,000 - 0,950 - 0,900$ показват ориентировъчно диапазон, в който може да се очаква реална стойност за кпд на тягова мрежа за променлив ток в еднопътен участък.

ОПИТНИ РЕЗУЛТАТИ

Примерните изчисления показват необходимостта от по-точно определяне на енергийния кпд на тягова мрежа с данни от измервания с реален влак. Подобно определяне е правено и показано в [2], но се отнася за тягова мрежа в двупътен участък.

Практическото измерване е извършено отново на 27 юни 2008г. с товарен влак 60611, състоящ се от 18 вагона с обща маса 1170 t. Влакът е с единична тяга - един локомотив 44001/6 с тиристорни токоизправители. Маршрутът му е от Подуяне до Перник и включва еднопътния участък Волюяк-Бригадир-Храбърско-Златуша с дължина 25 km . Проводниците на контактната мрежа в конкретния участък са: носещо въже - медно 70 mm^2 и контактен проводник - меден 100 mm^2 . Данни за релсите няма. Предварително

към веригите на измервателните трансформатори (800/5A и 35/0,1kV) на извод "Бригадир" в ТПС "Волюяк" е свързан мрежов анализатор МС750 4521. Вторият мрежов анализатор МС750 4522 е присъединен към веригите на електромера 3720АСМ на локомотива (500/5A 25000/100V). Данните за напреженията, токовете и мощностите от двата анализатора са показани за сравнение в таблицата едни до други - фиг. 1. На редове 5 и 37 напрежението на локомотива е значително по-ниско от номиналното и отразява преминаването му през двете неутрални вставки, т.е. в началото - 12:08 и в края - 12:40 на предвиденото мерене. По същото време в този участък не са допускани други влакове.

На фиг.2 е показана разликата $UI_{\text{Бриг-Улок}}$ между напрежението на шините в подстанция "Волюяк" и токоприемника на отдалечаващия се локомотив. Започвайки от ред 5 във всяка клетка на колони Е и F се добавя следващата средна едноминутна мощност. Така накрая, в 12:40, са получени две активни енергии - $920,5\text{ kWh}$ през извод "Бригадир" и $910,5\text{ kWh}$ - през токоприемника на локомотива. В двете енергии неявно са се отразили и изменящият се фактор на мощност $\cos \varphi$ и мощността от несинусоидалните токове и напрежения. Енергийният кпд на тяговата мрежа се получава от делението на измерените енергии:

$$\eta_{\text{ETM}} = E_{\text{PI.Локо}} / E_{\text{PI.Бр2др}} =$$

$$= 910,5\text{ kWh} / 920,5\text{ kWh} = 0,9891.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученият енергиен коефициент на полезно действие е доста висок. Както е показано по-горе той ще се променя при наличие на други локомотиви, черпещи ток от същия извод. Знакът на промяната зависи от наклоните на пътя и посоката на движение на влака/влаковете, а големината - от интервала на изследване - например 32 минути, както по-горе с влак 44001, или 24 часа, или до преминаване на определен брой влакове. Влияние оказва и дължината на участъка захранен от този извод, начина на следване на влаковете - пакетно/свободно и т.н. Проблемът с активните загуби на електроенергия в тяговите мрежи не е намерил универсално решение засега.

Намерената стойност на енергийния кпд на контактната мрежа може да бъде използвана за пресмятане и анализ на загубите, а също така и при разпределение на общото количество електроенергия между различни консуматори на страна 25 kV.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	S
1	Date	U1		I1		P1		Q1			
2	6/27/2008	V		A		W		Var			V.
3		Бргдр	Локо	Бргдр	Локо	Бргдр	Локо	Бргдр	Локо	Бргдр	
4											
5	12:08	26434	17260	3.8	8.9	0	130000	-35000	180000	98000	
6	12:09	25961	25810	115.1	117.5	2254000	2280000	1897000	1980000	2954000	
7	12:10	25970	25830	93.8	95.8	1757000	1780000	1680000	1710000	2436000	
8	12:11	25953	25800	93.4	95.5	1743000	1760000	1673000	1700000	2422000	
9	12:12	25751	25550	112.8	110.7	2212000	2140000	1869000	1830000	2898000	
10	12:13	26180	26250	3.3	4.7	63000	50000	56000	100000	84000	
11	12:14	25865	25790	44.5	46.7	805000	830000	798000	850000	1141000	
12	12:15	25751	25690	35.5	38.3	714000	740000	546000	610000	910000	
13	12:16	25708	25390	111.5	113.0	1897000	1900000	2142000	2150000	2863000	
14	12:17	25918	25700	81.4	81.0	1428000	1400000	1547000	1530000	2107000	
15	12:18	25786	25500	93.9	96.3	1617000	1630000	1792000	1830000	2415000	
16	12:19	25839	25460	112.4	112.9	1932000	1910000	2163000	2140000	2905000	
17	12:20	25734	25360	107.0	107.6	1827000	1800000	2058000	2040000	2751000	
18	12:21	25848	25430	111.4	112.6	1904000	1890000	2156000	2140000	2877000	
19	12:22	25786	25340	111.9	113.0	1904000	1890000	2163000	2140000	2884000	
20	12:23	25708	25240	115.7	116.5	1967000	1940000	2226000	2200000	2975000	
21	12:24	25839	25280	123.1	124.2	2100000	2080000	2387000	2350000	3178000	
22	12:25	25699	25130	120.9	121.6	2051000	2030000	2324000	2280000	3101000	
23	12:26	25576	25040	112.8	113.5	1897000	1860000	2170000	2140000	2884000	
24	12:27	25226	24560	125.4	126.4	2093000	2060000	2366000	2310000	3157000	
25	12:28	25393	24830	115.8	116.3	1939000	1900000	2205000	2160000	2940000	
26	12:29	25148	24750	81.6	80.8	1337000	1290000	1526000	1480000	2030000	
27	12:30	25725	25380	65.1	66.9	1155000	1150000	1148000	1190000	1652000	
28	12:31	25690	25410	61.1	60.9	1176000	1140000	973000	1040000	1540000	
29	12:32	25848	25720	25.3	26.8	371000	360000	532000	580000	651000	
30	12:33	25541	25480	23.3	24.9	322000	330000	490000	540000	588000	
31	12:34	25629	25280	61.4	63.8	1169000	1190000	1036000	1060000	1568000	
32	12:35	24736	23890	137.4	140.0	2198000	2160000	2576000	2530000	3395000	
33	12:36	26189	25210	151.5	152.4	2674000	2630000	2926000	2800000	3969000	
34	12:37	26373	25230	165.5	166.4	3283000	3210000	2863000	2680000	4361000	
35	12:38	26530	25490	158.5	158.7	3367000	3280000	2296000	2350000	4102000	
36	12:39	26626	25590	144.4	144.4	3038000	2950000	1554000	2210000	3528000	
37	12:40	27160	18600	52.5	48.2	1036000	940000	588000	800000	1288000	
38	12:41	26933	26030	3.4	3.7	0	40000	-84000	90000	91000	

Фиг.1 Напрежения, токове, активни и реактивни мощности на извод "Бригадир" на ТПС"Волюяк" и на токоприемника на локомотив 44001, черпещ ток от същия извод.

Microsoft Excel - 44001_Brigadir.xls

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help Adobe PDF

Arial 10 B I U % ↕ ↔

English to Russian

E37 =E36+CompareIF37/(60*1000)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Date	U1бриг-U1лок	I1 Avg	Z1 Avg	E P1		E QL	
2	6/27/2008	V	A	Ohm	kWh		VArh	
3					Бргдр	Локо	Бргдр	Локо
4								
5	12:08	9174	6.37	1440.188	0.0	2.2	0	0
6	12:09	151	116.31	1.298	37.6	40.2	31.6	33.0
7	12:10	140	94.78	1.477	66.9	69.8	59.6	61.6
8	12:11	153	94.43	1.620	95.9	99.2	87.5	89.8
9	12:12	201	111.75	1.799	132.8	134.8	118.7	120.3
10	12:13	-70	3.99	-17.544	133.8	135.7	119.6	122.0
11	12:14	75	45.59	1.645	147.2	149.5	132.9	136.2
12	12:15	61	36.91	1.653	159.1	161.8	142.0	146.3
13	12:16	318	112.26	2.833	190.8	193.5	177.7	182.2
14	12:17	218	81.18	2.685	214.6	216.8	203.5	207.7
15	12:18	286	95.11	3.007	241.5	244.0	233.3	238.2
16	12:19	379	112.65	3.364	273.7	275.8	269.4	273.8
17	12:20	374	107.32	3.485	304.2	305.8	303.7	307.8
18	12:21	418	112.02	3.731	335.9	337.3	339.6	343.8
19	12:22	+	446	112.46	3.966	367.6	368.8	375.7
20	12:23		468	116.09	4.031	400.4	401.2	412.8
21	12:24		559	123.66	4.520	435.4	435.8	452.6
22	12:25		569	121.24	4.693	469.6	469.7	491.3
23	12:26		536	113.15	4.737	501.2	500.7	527.5
24	12:27		666	125.88	5.291	536.1	535.0	566.9
25	12:28		563	116.07	4.851	568.4	566.7	603.6
26	12:29		398	81.2	4.901	590.7	588.2	629.1
27	12:30		345	66.01	5.226	609.9	607.3	648.2
28	12:31		280	61.01	4.589	629.5	626.3	664.4
29	12:32		128	26.04	4.916	635.7	632.3	673.3
30	12:33		61	24.09	2.532	641.1	637.8	681.5
31	12:34		349	62.58	5.577	660.6	657.7	698.7
32	12:35		846	138.68	6.100	697.2	693.7	741.7
33	12:36		979	151.96	6.442	741.8	737.5	790.4
34	12:37		1143	165.96	6.887	796.5	791.0	838.1
35	12:38		1040	158.59	6.558	852.6	845.7	876.4
36	12:39		1036	144.4	7.175	903.2	894.8	902.3
37	12:40		8560	50.34	170.044	920.5	910.5	912.1
38	12:41		903	3.53	255.8074	920.5	910.5	912.1

Ready

Фиг.2 Разлики в напреженията, средно аритметичен ток, импеданс и активни енергии на извод "Бригадир" в ТПС "Волуяк" и токоприемника на локомотив 44001, черпещ ток от същия извод.

ЛИТЕРАТУРА:

[1] Техническа спецификация за оперативна съвместимост за подсистема "Енергия", Приложение №4 към Чл.5, ал.1 на Наредба №57, ДВ 55 и 60 от 07.2004г.

[2] Петров Ив., Н.Ненов, Експериментално определяне коефициента на полезно действие на контактна мрежа за променлив ток в една фидерна зона, Сб.доклади от научна конференция "ТЕМПТ 2001", стр.515-518, ВТУ"Т.Каблешков", София, 15-16.11.2001г.

EFFICIENCY OF ALTERNATING CURRENT TRACTION NETWORK IN A UNIFLOW TRACK SECTION

Peter MATOV, Alexander VETSKOV

*Assoc. Prof. Peter Matov, Ph.D., Technical University, Sofia,
Eng. Alexander Vetskov, National Railway Infrastructure Company, Sofia,
BULGARIA*

***Abstract:** Active power and energy losses in alternating current traction networks attract less attention than tension losses at the designing stage of an electrified railway section as well as in operation. The paper shows calculated and measured values of this type of networks efficiency; these values confirm the insignificant quantitative participation of active losses in overall traction electric power.*

***Key words:** electrification, catenaries, electric power, efficiency.*