

AFD 기법의 출력전력 분석

이기옥*, 최주엽*, 최 익**, 유권종***

*광운대학교 전기공학과(skalrl@nate.com),

**광운대학교 정보제어공학과(skalrl@nate.com),

***한국에너지기술연구원 태양광발전연구센터(y-gj@kier.re.kr)

Output Power Analysis for Active Frequency Drift Method

Lee, Ki-Ok*, Choi, Ju-Yeop*, Choy, Ick**, Yu, Gwon-Jong***

*Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon University(skalrl@nate.com),

**Dept. of Information and Control Eng., Kwangwoon University,

***Korea Institute of Energy Research

Abstract

As the grid-connected photovoltaic power conditioning systems (PVPCS) are installed in many residential areas, these have raised potential problems of network protection on electrical power system. One of the numerous problems is an Islanding phenomenon.

In this paper, active frequency drift (AFD) method, one of the anti-islanding analyzed by current magnitude compensation and calculation of RMS value of the output power.

Keywords : 태양광 전력변환기(PV PCS), 단독운전(Islanding), 단독운전방지방법(Anti-Islanding Method)

기 호 설 명

cf	: chopping fraction of AFD
THD	: 고조파 왜형율
T_{Vutil}	: 계통전압의 한주기 시간
$T_{I_{pv}}$: 출력전류의 유효 시간
t_z	: 계통전압의 반주기 동안 전류가 0이 되는 시간
RMS	: 실효값
PF	: 역율(power factor)

1. 서 론

본 논문에서는 분산전원용 계통연계형 인버터에서 주로 사용되는 능동적 단독운전방지법 중의 하나인 능동적 주파수 변동(active frequency drift method : 이하 AFD)기법에 대하여 chopping fraction(이하 cf)에 의한 출력전류 파형을 수학 모델링을 통하여 cf 에 의한 출력전류의 고조파 왜형율, 출력전력 및 역율(power factor : 이하 PF) 등을 분석하고자 한다.

접수일자 : 2009년 11월 04일, 심사완료일자:2009년 10월 00일

교신저자 : 이기옥(skalrl@kier.re.kr)

2. AFD 기법

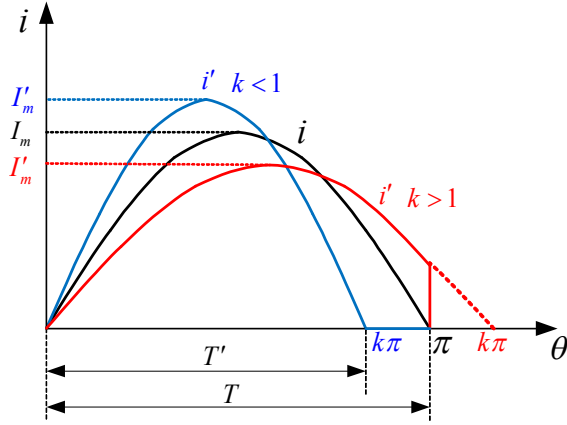


그림 1. AFD 기법의 출력전류 반주기 파형

전력변환기가 출력전류의 주파수를 그림 1과 같이 계통전압의 주파수보다 빠르게 또는 느리게 제어하는 기법이다^[1]. 전력변환기가 계통으로 주입하는 전류의 주파수가 계통전압 주파수보다 빠르거나 느린 정도를 계통전압의 반주기 동안 출력전류가 “0”이 되는 시간의 비율인 cf 으로 나타낼 수 있고, 이는 식 (1)로 정의된다.

$$cf = \frac{T - T'}{T} \quad (1)$$

계산의 편의를 위한 변수 k 의 정의식은 식 (2), cf 가 0일 경우의 출력전류는 식 (3), cf 가 0이 아닐 경우의 출력전류는 식 (4)와 같다. 또한, cf 가 0일 경우의 평균 전력은 식 (5)와 같다. 모든 모델링은 식 (5)와 같이 cf 가 0일 경우의 평균전력과 cf 가 0이 아닐 경우의 평균전력이 같다고 가정하여, cf 가 양이거나 음일 각각의 경우에 대하여 식 (4)의 첨두값(I'_m)을 계산하였다.

$$k = 1 - cf = \frac{T'}{T} \quad (2)$$

$$i = I_m \sin \theta \quad (3)$$

$$i' = I'_m \sin \frac{\theta}{k} \quad (4)$$

$$P_{av} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi ((V_m \sin \theta)(I_m \sin \theta)) d\theta \quad (5)$$

2.1. cf 가 +(양)인 경우

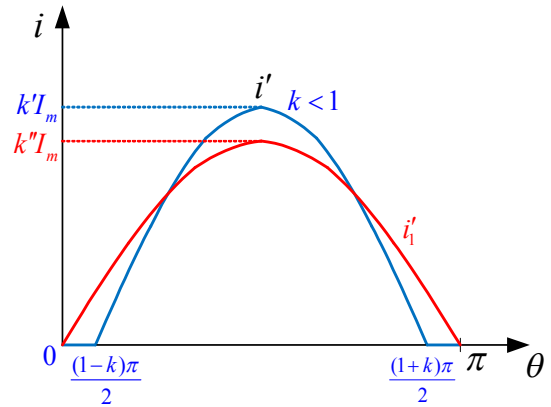


그림 2. 푸리에 급수 전개를 위한 전류 위상 천이

cf 의 크기가 $0 < cf < 1$ 인 경우, k 는 식 (3)에 의하여 cf 와 같은 범위인 $0 < k < 1$ 이 된다. 이 때 평균출력 전력은 식 (6)과 같이 계산된다.

$$P_{av} = \frac{1}{\pi} \int_0^{k\pi} ((V_m \sin \theta) (I'_m \sin \frac{\theta}{k})) d\theta \quad (6)$$

cf 가 0일 경우의 출력전력 식 (5)와 cf 가 양의 값일 경우의 출력전력 식 (6)을 동일하다고 하면 출력전류의 첨두값(I'_m)과 k 은 식 (7), 식 (8)과 같이 계산된다.

$$I'_m = \frac{\pi(1-k^2)}{2k \cdot \sin(k\pi)} I_m = k' I_m \quad (7)$$

$$k' = \frac{\pi(1-k^2)}{2k \cdot \sin(k\pi)} \quad (8)$$

그러므로, 식 (7)을 식 (4)에 대입하여 cf 가 양(+)일 경우 출력전류는 식 (9)로 정리된다.

$$i' = \frac{\pi(1-k^2)}{2k \sin(k\pi)} I_m \sin\left(\frac{\theta}{k}\right) \quad (9)$$

cf 에 의하여 왜곡된 출력전류의 파형을 푸리에 급수전개를 하면 식(10)과 같고, 고조파 분석을 용이하게 하기 위해 그림 2와 같이 출력전류의 위상을 $(1-k)\pi/2$ 만큼 천이시키면, 출력전류의 파형은 기함수(odd function)이므로 푸리에 급수 전개에서 b_n 요소는 0이 되어 소거된다. 그러므로 출력전류의 식은 식 (11)에 표현한 것과 같이 그 구간에서만 유효한 값이 되고, 그 외에는 0이 된다. 식 (11)을 이용하여 THD 계산을 위한 기본과 성분(a_1)을 정리하면, 식(12)와 같이 출력전류의 기본과 성분을 계산할 수 있다. 그러므로 출력전류의 THD 계산식은 식 (13)과 같이 정의하여 실효값으로 정리, 유도하면 식 (14)와 같다.

$$i' = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin n\theta + b_n \cos n\theta) \quad (10)$$

$$i' = k' I_m \sin\left(\frac{\theta}{k} - \frac{(1-k)\pi}{2k}\right) \quad (11)$$

$$\text{at } \frac{(1-k)\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{(1+k)\pi}{2}$$

$$a_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} i' \sin\theta d\theta = k'' I_m \quad (12)$$

$$k'' = \left(\sin\left(\frac{k\pi}{2}\right)\right)^{-1}$$

$$\therefore i_1' = k'' I_m \sin\theta$$

$$i_h = i' - i_1' \quad (13)$$

$$THD_i = \frac{i_{h,rms}}{i_{m,rms}} = \sqrt{k \left(\frac{k'}{k''}\right)^2 - 1} \quad (14)$$

식 (9)의 출력전류 식을 식 (15)의 실효값을 구하기 위한 정의에 대입하면, 식 (16)과

같이 출력전류의 실효값은 k 에 의한 함수로 정리된다.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i'^2 d\theta} \quad (15)$$

$$i'_{rms} = \sqrt{\frac{k}{2}} k' I_m = \frac{\pi(1-k^2)}{2\sqrt{2k} \sin(k\pi)} I_m \quad (16)$$

식 (17)의 역률 정의식에 식 (16)을 대입하여 정리하면, 식 (18)과 같이 k 에 의한 역률을 계산할 수가 있다.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\frac{V_m I_m}{2}}{v_{rms} i'_{rms}} \quad (17)$$

$$PF_{cf+} = \frac{2\sqrt{k} \sin(k\pi)}{\pi(1-k^2)} \quad (18)$$

또한, 피상전력(S_{cf+})은 식 (19)와 같이 계산되고, 이를 식 (20)에 대입하면, k 에 의하여 발생하는 무효전력을 계산할 수 있다.

$$S_{cf+} = \frac{P}{PF} = \frac{\pi(1-k^2)}{2\sqrt{k} \sin(k\pi)} P \quad (19)$$

$$Q_{cf+} = \sqrt{S_{cf+}^2 - P^2} = S_{cf+} \sqrt{1 - PF^2} \quad (20)$$

2.2. cf 가 -(음)인 경우

cf 의 크기가 $-1 < cf < 0$ 인 경우, k 는 식 (2)에 의하여 $1 < k < 2$ 이 되고, 이 때 평균전력은 식 (6)과 비교하여 적분의 범위가 $0 \sim k\pi$ 가 아니라 $0 \sim \pi$ 로 식(21)과 같이 계산된다.

$$P_{av} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left((V_m \sin\theta) \left(I_m \sin\left(\frac{\theta}{k}\right) \right) \right) d\theta \quad (21)$$

cf 가 0일 경우의 출력전력 식 (5)와 cf 가 음의 값일 경우의 출력전력 식 (21)을 등식으로 하여, 식 (22), 식 (23)과 같이 출력전류

의 첨두값(I'_m)과 k' 를 계산할 수 있다.

$$I'_m = \frac{\pi(k^2 - 1)}{2k^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{k}\right)} I_m = k' I_m \quad (22)$$

$$k' = \frac{\pi(k^2 - 1)}{2k^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{k}\right)} \quad (23)$$

그러므로, 식 (22)를 식 (5)에 대입하면 cf 가 음(-)일 경우의 출력전류는 식 (24)로 정리된다.

$$i' = \frac{\pi(k^2 - 1)}{2k^2 \sin\left(\frac{\pi}{k}\right)} I_m \sin\left(\frac{\theta}{k}\right) \quad (24)$$

cf 가 음(-)일 경우, 식 (10)의 푸리에 급수 전개는 우함수(even function)가 되어 b_n 성분은 소거되지 않고, 다음의 식 (25)~(26)과 같이 기본 주파수에 해당하는 각 계수가 계산 된다.

$$a_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi i' \sin\theta d\theta = I_m \quad (25)$$

$$b_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi i' \cos\theta d\theta = k_b I_m \quad (26)$$

$$k_b = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{k}\right) + 1}{k \cdot \sin\left(\frac{\pi}{k}\right)}$$

식 (25), 식 (26)을 식 (10)에 대입하여 정리한 출력전류의 기본파 성분은 식 (27)과 같다.

$$i_1' = k'' I_m \sin(\theta - \alpha) \quad (27)$$

$$\text{at } k'' = \sqrt{1 + k_b^2}, \alpha = \sin^{-1}(k_b/k)$$

출력전류 고조파 성분을 계산하기 위한 식

(13)을 이용하여 실효값으로 정리하고, 고조파 왜형율의 계산식을 유도하면 식 (28)과 같다.

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{k'}{k''}\right)^2 \left(1 - \frac{k}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{k}\right)\right) - 1} \quad (28)$$

식 (24)의 출력전류 식을 식 (15)의 실효값 정의식에 대입하면, 출력전류의 실효값은 식 (29)와 같이 k 에 의한 함수로 정리된다.

$$i'_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{k}{4\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{k}\right)} \frac{\pi(k^2 - 1)}{2k^2 \sin\left(\frac{\pi}{k}\right)} I_m \quad (29)$$

식 (17)의 역률 정의식에 식 (29)를 대입하여 정리하면, 식 (30)과 같이 k 에 의한 역률을 계산할 수가 있다.

$$PF_{cf-} = \frac{\sqrt{2} k^2 \sin\left(\frac{k}{\pi}\right)}{\pi(k^2 - 1) \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{k}{4\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{k}\right)}} \quad (30)$$

또한, 피상전력(S_{cf-})은 식 (31)와 같이 계산되고, 이를 식 (32)을 대입하면 k 에 의하여 발생하는 무효전력을 계산할 수 있다.

$$S_{cf-} = \frac{\pi(k^2 - 1) \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{k}{4\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{k}\right)}}{\sqrt{2} k^2 \sin\left(\frac{k}{\pi}\right)} P \quad (31)$$

$$Q_{cf-} = S_{cf-} \sqrt{1 - PF^2} \quad (32)$$

2.3. 계산 결과

2.1장에서 유도된 cf 에 의한 고조파 왜형율(THD)은 식 (14), 2.2장의 식 (28)의 결과를 근거로 표 1에 cf 에 따른 출력전류의 THD를 나타내었고, 그림 3에 그 결과를 도시하였다.

표 1. cf에 따른 THD 계산 결과

cf	k	k'	k''	THD	cf	k	k'	k''	THD
-15.0%	1.150	0.961	1.01619	12.22%	0.0%	1.000	0.000	0.00000	0.00%
-14.0%	1.140	0.962	1.01457	11.58%	0.5%	0.995	1.003	1.00003	0.52%
-13.0%	1.130	0.963	1.01299	10.92%	1.0%	0.990	1.005	1.00012	1.04%
-12.0%	1.120	0.965	1.01144	10.24%	1.5%	0.985	1.008	1.00028	1.56%
-11.0%	1.110	0.966	1.00994	9.53%	2.0%	0.980	1.011	1.00049	2.08%
-10.0%	1.100	0.968	1.00851	8.80%	2.5%	0.975	1.014	1.00077	2.60%
-9.0%	1.090	0.970	1.00713	8.05%	3.0%	0.970	1.017	1.00111	3.12%
-8.0%	1.080	0.972	1.00584	7.27%	3.5%	0.965	1.020	1.00151	3.64%
-7.0%	1.070	0.974	1.00463	6.46%	4.0%	0.960	1.024	1.00198	4.16%
-6.0%	1.060	0.977	1.00353	5.63%	4.5%	0.955	1.027	1.00250	4.69%
-5.0%	1.050	0.980	1.00254	4.77%	5.0%	0.950	1.031	1.00309	5.21%
-4.5%	1.045	0.981	1.00210	4.33%	6.0%	0.940	1.038	1.00446	6.27%
-4.0%	1.040	0.983	1.00169	3.88%	7.0%	0.930	1.046	1.00608	7.32%
-3.5%	1.035	0.985	1.00132	3.42%	8.0%	0.920	1.055	1.00795	8.38%
-3.0%	1.030	0.987	1.00099	2.96%	9.0%	0.910	1.064	1.01008	9.45%
-2.5%	1.025	0.989	1.00070	2.48%	10.0%	0.900	1.073	1.01247	10.52%
-2.0%	1.020	0.991	1.00046	2.00%	11.0%	0.890	1.083	1.01512	11.60%
-1.5%	1.015	0.993	1.00026	1.52%	12.0%	0.880	1.094	1.01803	12.68%
-1.0%	1.010	0.995	1.00012	1.02%	13.0%	0.870	1.105	1.02122	13.76%
-0.5%	1.005	0.998	1.00003	0.51%	14.0%	0.860	1.117	1.02468	14.86%
0.0%	1.000	0.000	1.00000	0.00%	15.0%	0.850	1.130	1.02842	15.95%

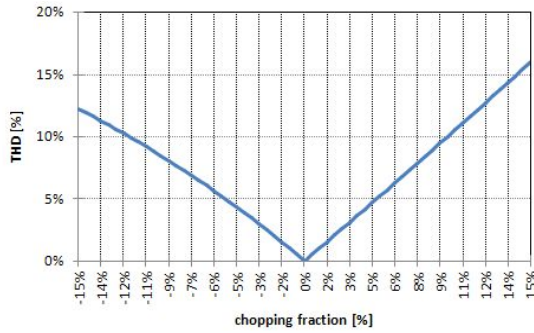


그림 3. cf에 따른 THD

표 2. cf가 +(양) : 역률 및 전력 계산 결과

cf	k	k'	PF	S	Q
0.5%	0.995	1.0026	1.0000	1.0000	0.0094
1.0%	0.990	1.0052	0.9998	1.0002	0.0188
1.5%	0.985	1.0080	0.9996	1.0004	0.0282
2.0%	0.980	1.0109	0.9993	1.0007	0.0377
2.5%	0.975	1.0139	0.9989	1.0011	0.0471
3.0%	0.970	1.0170	0.9984	1.0016	0.0566
3.5%	0.965	1.0202	0.9978	1.0022	0.0660
4.0%	0.960	1.0235	0.9972	1.0028	0.0755
4.5%	0.955	1.0270	0.9964	1.0036	0.0850
5.0%	0.950	1.0305	0.9956	1.0045	0.0945
6.0%	0.940	1.0381	0.9936	1.0064	0.1136
7.0%	0.930	1.0460	0.9913	1.0088	0.1327
8.0%	0.920	1.0545	0.9886	1.0115	0.1520
9.0%	0.910	1.0636	0.9856	1.0146	0.1714
10.0%	0.900	1.0731	0.9823	1.0181	0.1909
11.0%	0.890	1.0832	0.9786	1.0219	0.2105
12.0%	0.880	1.0939	0.9745	1.0262	0.2303
13.0%	0.870	1.1052	0.9701	1.0308	0.2503
14.0%	0.860	1.1171	0.9653	1.0359	0.2704
15.0%	0.850	1.1296	0.9602	1.0414	0.2908

표 3. cf가 -(음) : 역률(PF) 및 전력 계산 결과

cf	k	k'	PF	S	Q
-0.5%	1.005	0.9976	1.0000	1.0000	0.0093
-1.0%	1.010	0.9952	0.9998	1.0002	0.0185
-1.5%	1.015	0.9930	0.9996	1.0004	0.0274
-2.0%	1.020	0.9908	0.9993	1.0007	0.0363
-2.5%	1.025	0.9888	0.9990	1.0010	0.0449
-3.0%	1.030	0.9868	0.9986	1.0014	0.0534
-3.5%	1.035	0.9849	0.9981	1.0019	0.0617
-4.0%	1.040	0.9832	0.9976	1.0024	0.0699
-4.5%	1.045	0.9815	0.9970	1.0030	0.0780
-5.0%	1.050	0.9798	0.9963	1.0037	0.0859
-6.0%	1.060	0.9768	0.9949	1.0051	0.1013
-7.0%	1.070	0.9741	0.9933	1.0067	0.1162
-8.0%	1.080	0.9717	0.9916	1.0085	0.1306
-9.0%	1.090	0.9696	0.9897	1.0104	0.1445
-10.0%	1.100	0.9676	0.9877	1.0124	0.1580
-11.0%	1.110	0.9660	0.9857	1.0145	0.1710
-12.0%	1.120	0.9645	0.9835	1.0167	0.1837
-13.0%	1.130	0.9633	0.9813	1.0190	0.1959
-14.0%	1.140	0.9623	0.9791	1.0214	0.2077
-15.0%	1.150	0.9615	0.9768	1.0238	0.2192

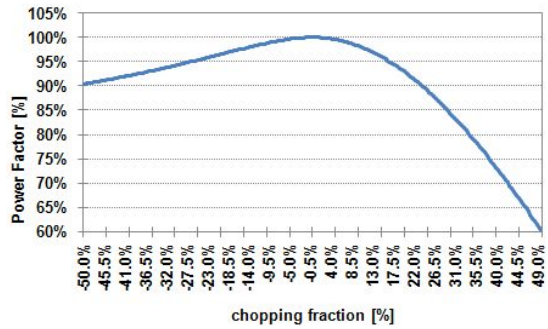


그림 4. cf에 따른 역률(PF)

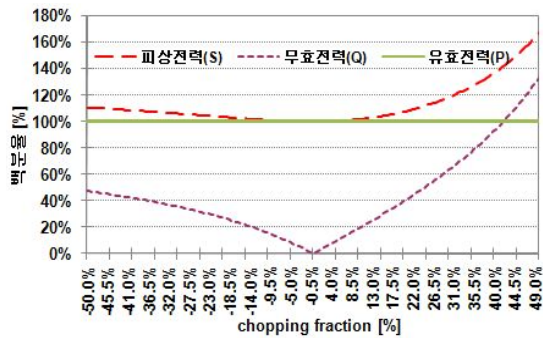


그림 5. cf에 따른 피상전력, 무효전력

2.1장에서 유도된 결과를 근거로 표 2에 cf가 양(+)일 경우의 역률, 피상전력, 무효전력

량을 계산한 것이고, 표 3은 2.2장에서 유도된 식을 근거로 cf 가 음(-)일 경우의 결과이다. 또한, cf 에 따른 역률은 그림 4에 도시하였고, 그림 5에 cf 에 따른 피상전력, 무효전력 및 유효전력을 도시하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 계통연계형 분산형 전원에 필수기법으로 사용되는 단독운전검출 기법 중 능동적 주파수 변화(active frequency drift : 이하 AFD)기법에 대하여 chopping fraction(이하: cf)에 따른 출력전류의 고조파 왜형율(THD), 역율(PF) 및 출력전력에 대하여 분석을 하였다. 기존 AFD기법의 출력전류의 품질 및 발전전력량의 분석은 실험적인 측정 방법이어서 미흡하였으나^[1], 본 논문에서는 출력전류의 파형에 따른 모델링에 의한 계산 결과로 기존 방법 보다 정밀하게 계산할 수 있었다. 그 결과 cf 가 양(+)일 경우와 음(-)일 경우에 출력전류의 고조파 왜형율(THD)의 기울기가 서로 다르게 분포한다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Ropp, M.E., Begovic, M., Rohatgi, A., "Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention," Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume: 14, Issue: 3, pp. 810-816, Sept. 1999