

능동적 주파수 변환기법의 출력전류 고조파 왜형률 분석

이기옥*, 최주엽*, 최 익**, 유권종***, 안진웅****

*광운대학교 전기공학과, **광운대학교 정보제어공학과,
한국에너지기술연구원 태양광발전연구센터, *대구경북과학기술원

THD Analysis of Output Current for Active Frequency Drift Method in Anti-islanding

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

*Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon University(skarl@nate.com),
**Dept. of Information and Control Eng., Kwangwoon University,
Korea Institute of Energy Research, *Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology

Abstract

As many grid-connected photovoltaic power conditioning systems (PVPCS) are installed in many residential areas simultaneously, 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 methods which is analyzed by current magnitude compensation and calculation of the fundamental component. Both harmonic component and RMS value of the output current for THD analysis are provided and verified by simulation.

Keywords : 태양광 전력변환기(PVPCS), 능동적 주파수 변동기법(active frequency drift method, AFD), 왜형률(THD), 단독운전방지방법(Anti-Islanding Method)

기 호 설 명

cf : chopping fraction of AFD
 THD : 고조파 왜형률
 T_{Vutil} : 계통전압의 한주기 시간
 $T_{I_{pv}}$: 출력전류의 유효 시간
 t_z : 계통전압의 반주기 동안 전류가 0이 되는 시간

1. 서 론

신재생에너지를 이용한 계통연계형 인버터의 단독운전 현상은 기존까지는 이론적으로만 가능할 것으로 여겨졌었다. 그런데, 연계되는 분산전원의 개체수 및 용량이 급격히 증가하여 이 단독운전이 발생할 수 있는 확률이 점점 높아지고 있고, 일각에서는 이미

접수일자 : 2009년 10월 13일, 심사완료일자:2009년 10월 25일, 게재확정일자 : 2010년 1월 5일,
교신저자 : 이기옥(skarl@kier.re.kr)

그 현상이 보고되고 있다[1]. 특히 많은 가구에서 집단적으로 태양광발전시스템을 운용할 경우 태양광용 전력변환기의 출력전력과 수용가의 소비전력이 평형을 이루게 되면, 계통이 상실되어도 연계점 전압의 실효값 및 주파수가 변동하지 않기 때문에 태양광용 전력변환기가 이러한 변화를 감지하지 못하고, 전력변환운전을 계속하는 단독운전이 발생하게 되는데, 이 현상을 피하지 못하면 기기고장, 인명피해가 발생하여 커다란 피해가 예상된다.

따라서 분산전원용 전력변환기가 이러한 단독운전 발생 시 이를 신속히 검출하고, 계통연계 동작인 전력변환운전을 정지하여 배전계통의 사고에 대한 안전성 및 신뢰성 확보가 절실하게 필요성이 증가하였고, 그 중 이 단독운전방지에 대한 연구가 활발히 진행 중이다[2], [3], [4].

본 논문에서는 능동적인 단독운전방지기법 중 하나인 주파수변동기법인 능동적 주파수변동기법(active frequency drift method : 이하 AFD기법)에 대하여 chopping fraction(이하 cf)에 의한 출력전류 고조파 분석을 수학적 모델링을 통하여 모델링하고, 그 결과를 PSIM에서 제공되는 FFT를 이용한 고조파 왜형률(THD)을 비교 및 검증함으로써, AFD 기법을 단독운전 검출기법으로 채택할 경우, 허용될 수 있는 cf 의 가용 범위를 제시하고자 한다.

2. AFD 기법

AFD 기법은 cf 를 이용하여 전력변환기가 변환하여 계통에 연계하는 출력전류의 주파수를 그림 1과 같이 계통전압의 주파수보다 빠르게 또는 느리게 제어하는 기법이다[2]. 즉, 전력변환기에서 계통으로 공급하는 전류의 주파수를 정확히 계통의 주파수에 동기시키는 것이 아니라 출력전류의 주파수를 계통전압 주파수보다 빠르게 느리게 바꾸어 단독운전발생시 계통전압의 주파수에 변화

가 발생하는 것을 이용하여 단독운전을 검출하는 방법이다. DSP와 같은 마이크로프로세서 기반의 인버터에서 비교적 쉽게 구현이 가능하고, 또한 계통이 사고나 인위적인 상황으로 인하여 단독운전이 발생하였을 경우, 최악의 상황인 전력변환기의 출력전력과 부하 소비전력사이에 전력평형이 이루어졌다 하더라도 출력전압이 출력전류를 따라감으로 주파수의 변화를 일으킴으로 계통전압의 주파수에 영향을 주어 결과적으로 OFR/UFR을 이용하여, 단독운전을 검출하는 기법이다.

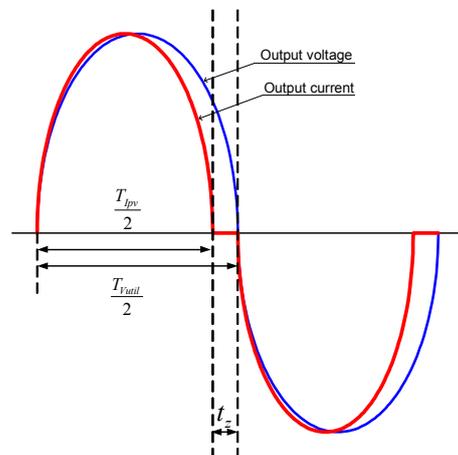


그림 1. AFD 기법의 전압전류 파형

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.

$$cf = \frac{2 \times t_z}{T_{util}} \quad (1)$$

그림 2와 같이 모델링의 편의를 위하여 계통전압의 반주기 동안에 나타나는 것으로 가정하면, 식 (1)은 식(2)로 다시 정의된다.

그림 2에서 계산의 편의를 위한 정의식 k

는 식 (3), 출력전류의 수식은 식 (4), 식 (5)와 같고, cf 가 0일 경우의 평균 전력은 식 (6)과 같다. 모든 모델링은 식 (6)과 같이 cf 가 0 일 경우의 전력과 cf 가 0이 아닐 경우의 전력이 같다고 가정하여, cf 가 양이거나 음일 경우에 대하여 각각 식 (5)의 첨두값 (I'_m)을 계산하였다.

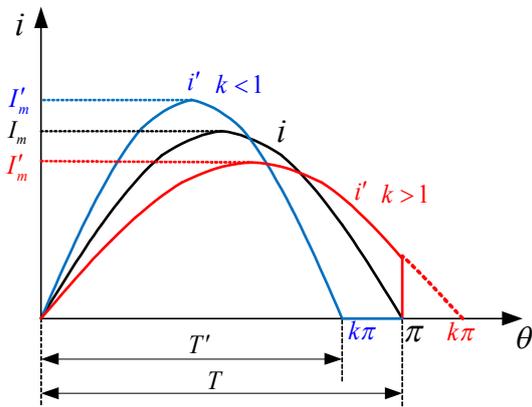


그림 2. AFD 반주기 파형

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

$$k = 1 - cf = \frac{T'}{T} \quad (3)$$

$$i = I_m \sin \theta \quad (4)$$

$$i' = I'_m \sin \frac{\theta}{k} \quad (5)$$

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

2.1. cf 가 +(양)인 경우

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 평균 전력은 식 (7)과 같이 계산 된다.

$$P_{av} = \frac{1}{\pi} \int_0^{k\pi} \left((V_m \sin \theta) \left(I'_m \sin \frac{\theta}{k} \right) \right) d\theta \quad (7)$$

cf 가 0일 경우의 평균전력식 (6)과 cf 가 양의 값으로 존재할 경우의 평균전력식 (7)을 동일하다는 가정에 의하여 식 (8)과 같이 cf 가 양의 값일 경우에 출력전류의 첨두값 (I'_m)이 계산된다.

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

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

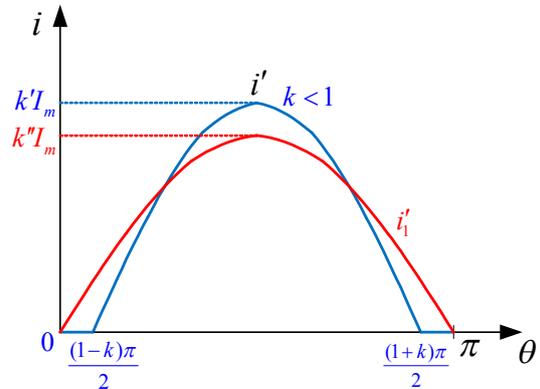


그림 3. 푸리에 급수 전개를 위한 전류 위상 천이

$$i' = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin n\theta + b_n \cos n\theta) \quad (9)$$

$$i' = k' I_m \sin \left(\frac{\theta}{k} - \frac{(1-k)\pi}{2k} \right) \quad (10)$$

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

$$i_1'' = k'' I_m \sin \theta \quad (11)$$

$$\Rightarrow a_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} i' \sin \theta d\theta = k'' I_m$$

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

푸리에 급수는 식(9)와 같고, 고조파 분석을 용이하게 하기 위해 그림 3과 같이 출력전류의 위상을 천이시키면, 출력전류의 파형은 기함수(odd function)이므로 푸리에 급수

전개에서 b_n 요소는 0이 되어 소거된다. 그러므로 출력전류의 식은 식 (10)과 같이 구간별로 정리될 수 있고, 식 (10)을 이용하여 THD 계산을 위한 기본파 성분(a_1)을 정리하면, 식(11)과 같이 출력전류의 기본파 성분을 계산 할 수 있다.

출력전류의 THD 계산식은 식 (12)와 같이 정의하여 실효값으로 정리하여 유도하면 식 (13)과 같다.

$$i_h = i' - i'_1 \quad (12)$$

$$THD_i = \frac{i_{h,rms}}{i'_{rms}} = \sqrt{k \left(\frac{k'}{k} \right)^2 - 1} \quad (13)$$

2.2. cf가 -(음)인 경우

cf의 크기가 $-1 < cf < 0$ 인 경우, k는 식 (3)에 의하여 $1 < k < 2$ 이 되고, 이 때 평균 전력은 식 (7)과 비교하여 적분의 범위가 $0 \sim k\pi$ 가 아니라 $0 \sim \pi$ 로 식(14)와 같이 계산 된다.

$$P_{av} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left(V_m \sin\theta \right) \left(I'_m \sin \frac{\theta}{k} \right) d\theta \quad (14)$$

cf가 0일 경우의 평균전력식 (6)과 cf가 음의 값으로 존재할 경우의 평균전력식 식 (14)를 동일하다는 가정에 의하여 식 (15)와 같이 cf가 음의 값일 경우에 출력전류의 첨두값(I'_m)이 계산된다.

$$I'_m = \frac{\pi(k^2 - 1)}{2k^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{k}\right)} I_m = k' I_m \quad (15)$$

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

이 전류파형을 푸리에 급수 전개를 하면

식 (9)과 같고, 기본 주파수에 해당하는 관계수는 식 (16)~(17)과 같다.

$$a_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi i' \sin\theta d\theta = I_m \quad (16)$$

$$b_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi i' \cos\theta d\theta = k_b I_m \quad (17)$$

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

식 (16), 식 (17)을 식 (9)에 대입하여 정리한 출력전류의 기본파 성분은 식 (18)과 같다.

$$i'_1 = k'' I_m \sin(\theta - \alpha) \quad (18)$$

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

출력전류 THD 계산식은 식 (12)와 같이 정의하고, 실효값으로 정리하면 식 (19)와 같다.

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{k'}{k}\right)^2 \left(1 - \frac{k}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{k}\right)\right)^2} - 1 \quad (19)$$

2.3. 계산 결과

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%

cf 가 양일 경우, 식 (8), 식 (11), 식 (13)을 이용하여 계산한 결과와 cf 가 음일 경우 식 (15), 식 (18), 식 (19)을 이용한 결과는 표 1과 같다.

3. 시뮬레이션

2장에서 모델링 및 계산된 결과를 검증하기 위해서 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.

3.1. 시뮬레이션 회로

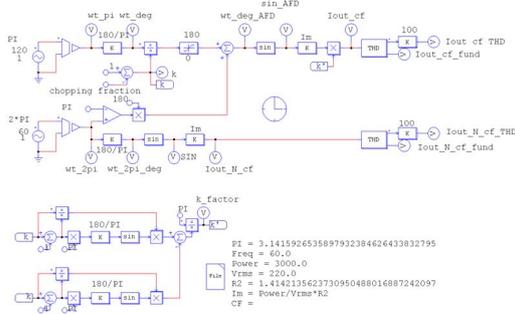


그림 4. THD를 계산하기 위한 PSIM 회로

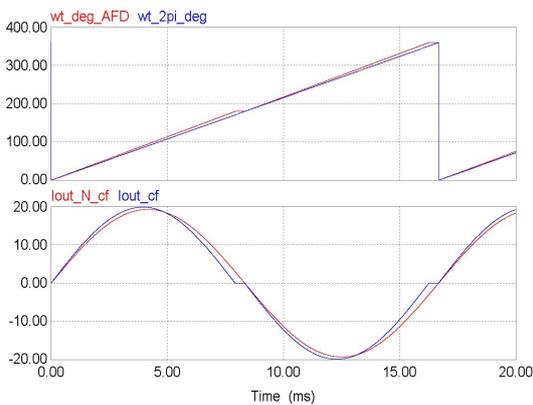


그림 5. $cf = 5\%$, 출력전류 파형과 위상

그림 4는 cf 에 따른 AFD 기법의 출력전류를 만들기 위해 사용한 블록들이다. cf 가 $\pm 5\%$ 일 경우의 위상(wt_deg_AFD), cf 가 0

일 경우의 위상(wt_2pi_deg), cf 가 고려된 출력전류 파형($Iout_cf$), cf 가 고려되지 않은 출력전류 파형($Iout_N_cf$)을 비교하여 도시하면 그림 5와 그림 6과 같다.

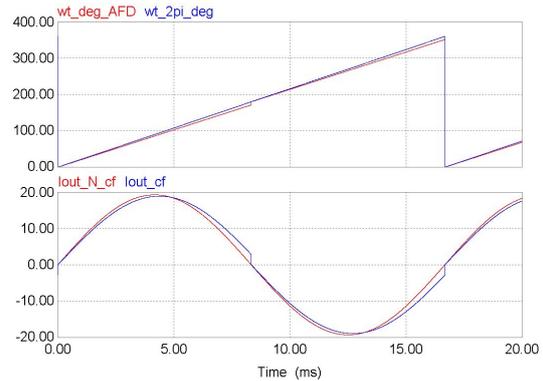


그림 6. $cf = -5\%$, 출력전류 파형과 위상

3.2. 시뮬레이션 결과

cf 를 -15% 에서 $+15\%$ 까지 변화시켜서 얻은 출력전류의 THD는 표 2와 같다.

표 2. cf 값 $-15\% \sim +15\%$ 변화에 따른 THD

cf	THD	cf	THD
-15.0%	12.16%	0.0%	0.00%
-14.0%	11.53%	1.0%	1.03%
-13.0%	10.87%	2.0%	2.06%
-12.0%	10.19%	3.0%	3.10%
-11.0%	9.49%	4.0%	4.14%
-10.0%	8.76%	5.0%	5.18%
-9.0%	8.01%	6.0%	6.23%
-8.0%	7.24%	7.0%	7.28%
-7.0%	6.44%	8.0%	8.33%
-6.0%	5.61%	9.0%	9.39%
-5.0%	4.75%	10.0%	10.46%
-4.0%	3.86%	11.0%	11.52%
-3.0%	2.95%	12.0%	12.60%
-2.0%	2.00%	13.0%	13.68%
-1.0%	1.02%	14.0%	14.76%
0.0%	0.00%	15.0%	15.85%

이상의 표 1과 표 2의 결과를 그림으로 비교하여 나타내면 그림 7과 같고, 출력전류의 THD는 cf 와 비례하는 관계임을 확인할 수 있다. 또한, cf 가 양일 경우에는 출력전류의

THD가 일정한 기울기로 비례 증가하고, 음일 경우에는 기울기가 일정치 않음을 알 수 있고, 계산결과의 오차는 최대 0.1% 이내로 매우 정밀한 계산 결과를 얻었다.

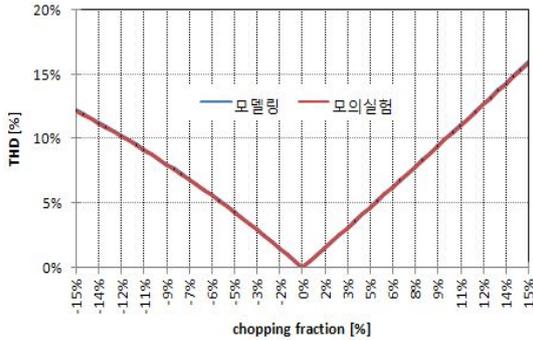


그림 7. cf 에 따른 THD 결과 비교

기존 AFD의 THD에 대한 연구는 수학적 접근이 아니고, Matlab을 이용한 해석적인 방법을 사용하였다^[5]. 그리하여 인버터의 PWM 스위칭에 의한 THD 성분과 인버터 출력단에 있는 저역 통과 필터의 필터링 능력에 대한 영향 및 출력전력의 크기에 의한 영향을 배제할 수 없었으나, 본 논문에서는 그러한 영향을 모두 제거하여 온전히 cf 에 의한 출력전류의 THD를 계산 및 분석할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 계통연계형 분산형 전원에 사용되는 단독운전검출기법 중 능동적 주파수 변화기법의 chopping fraction에 따른 출력전류의 고조파 분석을 하였다. 기존 AFD 기법의 cf 에 의한 출력전류의 고조파 분석은 실험적인 방법으로 측정되어 인버터의 PWM에 대한 영향 및 출력전류의 크기에 의한 영향으로 정밀하게 검증되지는 않았으나, 논문에서는 수학적 모델과 시뮬레이션으로 cf 에 의한 출력전류의 THD를 정밀하게 계산할 수 있었다. 그 결과 cf 가 양일 경우와 음일 경우

에 서로 기울기가 다르게 분포한다는 것을 알 수 있었다. 또한, 이 결과를 근거로 단독운전검출기법으로 AFD기법을 적용할 경우에는 인버터 고유의 THD를 참고하여, 계통연계형 인버터 출력전류 THD 기준인 5% 이내에서 변동시켜야 하므로 cf 의 크기는 5% 이내의 값이 반영되어야 함을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2008학년도 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

1. T.A.Short, "Distribution Reliability and Power Quality", Taylor & Francis, 2006.
2. 김홍성 외, "IEEE 929-2000 단독운전 시험 조건하에서 단상 계통연계형 PV 시스템의 Anti-Islanding을 위한 RPV 방식 및 AFD 방식의 해석 및 설계," 전력전자학회 논문지, 제 12권, 제 1호, pp.37-49, 2007
3. 최주엽 외 "태양광발전 시스템의 계통연계 보호를 위한 단독운전검출기법의 기술 개발에 관한 연구," 최종 보고서, 2003. 5, 산업자원부, 2001-N-PV03-P-01.
4. Ropp, M.E., Begovic, M., Rohatgi, A., Kern, G.A., Bonn, R.H., Sr., Gonzalez, S., "Determining the relative effectiveness of islanding detection methods using phase criteria and non-detection zones," Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume : 15, Issue : 3, Sept. 2000, pp. 290 - 296.
5. 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