

슬립모드 주파수변이 방식의 단독운전 검출법의 분석과 모델링

유병규, 정영석, 소정훈, 유권종

한국에너지기술연구원

Analysis and Modeling of Slip Mode Frequency Shift Method for Anti-islanding

Byung-Gyu Yu, Young-Seok Jung, Jung-Hun So, Gwon-Jong Yu

Korea Institute of Energy Research

Abstract - Islanding phenomenon is undesirable because it lead to a safety hazard to utility service personnel and may cause damage to power generation and power supply facilities as a result of unsynchronized reclosure. In order to prevent this phenomenon, various anti-islanding methods have been studied. Even though the slip mode frequency shift (SMS) method has been regarded as a highly effective anti-islanding method, the analytical design method of that was not cleared. This paper proposes a modeling of the SMS method using non-detection zone (NDZ) and evaluation of the method according to the test conditions of IEEE Std. 929-2000. The SMS method is derived analytically through modeling and verified visually by simulation and experiment.

1. 서 론

단독운전 현상이란 계통연계형 태양광발전시스템과 같은 분산전원이 계통전원이 정전된 후에도 발전을 지속하는 현상이다. 단독운전 현상은 계통이 복귀되는 순간에 PCS(Power Conditioning System)와 계통간의 위상차 등의 이유로 PCS 및 계통설비에 심각한 영향을 줄 가능성이 존재하므로, 계통연계형 PCS에 이러한 단독운전 현상을 검출하여 PCS 운전을 정지시키는 보호기능이 내장되어야 한다. 단독운전 검출기법은 크게 수동적 검출기법과 능동적 기법으로 분류될 수 있다. 특히 능동적 방법 중에서 슬립모드 주파수 변이(Slip Mode Frequency Shift, SMS) 방식은 그 단독운전 검출 성능의 우수성이 뛰어나 큰 주목을 받아 왔다[1]. 그럼에도 불구하고 SMS는 그 설계방식과 모델링에 대한 연구는 명확히 나와 있지 않았다. 이에 본 논문은 단독운전 미검출 영역(Non-Detection Zone, NDZ)에 대한 정의로부터 SMS 기법의 모델링을 제시하고, 이를 분석한다. 또한 제안된 방법을 통해서 IEEE Std. 929-2000에 의해 제시된 단독운전 시험법을 통해 그 우수성을 검증해 본다.

2. SMS 방식의 설계

2.1 기본개념

기존의 PCS(Power Conditioning System)의 위상검출 회로에서 PLL(Phase Locked Loop)은 전압과 전류의 위상이 동위상이 되도록 제어 하고 있다. 반면에 SMS 방식의 단독운전 검출기법에서는 인버터 출력전압과 전류의 위상차가 항상 0으로 제어되는 것이 아니라 계통 연계점 전압의 주파수의 합수가 되도록 제어 된다. 이것은 그림 1에서와 같이 PLL 입력단에 필터를 달아서 구현할 수 있다.

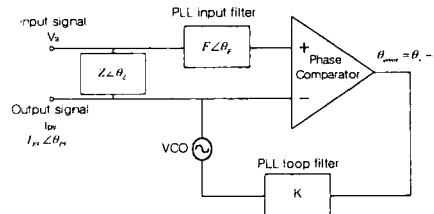


그림 1. SMS 기법에서 사용 되는 PLL의 구조

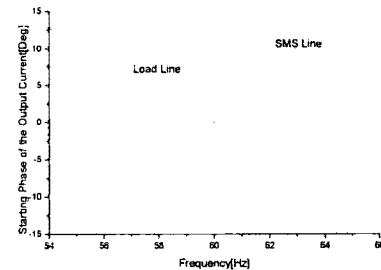


그림 2. 주파수에 따른 부하위상곡선과 SMS 곡선

그림 2에서 일반적으로 사용되는 SMS line인 정현파곡선과, 병렬 RLC 부하로 표현되는 출력 교류부하의 위상곡선(Load line)을 보여 주고 있다[1-2]. 계통이 PCS와 연계되어 있는 경우에는 계통전압의 주파수에 의해서만 그 동작점이 형성되지만, 반면에 계통과의 연계가 끊어지면 PLL의 구조에 의해 Load line과 SMS line의 합이 0이 되는 새로운 동작점으로 이동하게 된다. 만약 그 동작점이 주파수 릴레이가 차단되는 범위에 있도록 한다면, 단독운전은 검출할 수 있게 된다.

2.2 Load line 계산

IEEE Std. 929-2000에서 제시된 부하조건으로부터 load line을 계산할 수 있다. 본 시험 조건에서는 양호도를 2.5로 하도록 되어 있고, 이로부터 출력 유효정격이 정해지면 식 2에 의한 Load line을 구할 수 있다. 본 논문에서 3kW PCS를 통해서 제안된 분석기법을 검증하도록 한다. 이로부터 표 1과 같이 부하 조건을 구할 수 있고, 이로부터 그림 3과 같은 load line(θ_{L1})을 그릴 수 있게 된다.

$$Q_c = \frac{\sqrt{Q_L \times Q_C}}{P} \quad (1)$$

$$\theta_Z = -\tan^{-1} \left[R \left(2\pi f C - \frac{1}{2\pi f L} \right) \right] \quad (2)$$

where : θ_Z is 부하의 위상각

f0	60Hz	Qc	7500Var
V _{Line}	220Vrms	R	16.13?
P	3000W	L	17.1mH
Q _L	7500Var	C	411.0uF

표 1. IEEE Std. 929-2000에 따른 3kW PCS의 부하조건

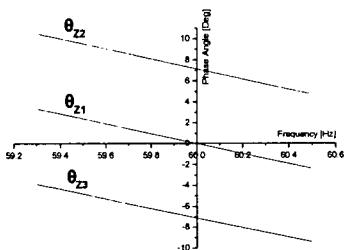


그림 3. 병렬 RLC 부하의 load line

여기서 덧붙여 제시한 규격은 부하 인덕턴스 L과 부하 커패시턴스 C 중 한 파라미터를 총 5% 까지 변화 시킨 후에 시험하도록 되어 있다. 본 논문에서는 부하 인덕턴스를 ±5% 변화시키도록 한다. 그림 3에서 θ_{Z2} 는 L을 +5%로 증가시킨 것이고, θ_{Z3} 는 L을 5%로 감소시켰을 때의 load line 이다.

2.3 SMS line 계산

제시된 규격 시험을 통과하기 위한 SMS line을 설계하기 위해서는 전압/주파수 릴레이의 정량적인 단독운전 미검출 영역이 필요하게 된다. Power Mismatch Space로 표현하는 NDZ에 대한 정의로부터 정량적인 NDZ는 이미 유도되었다. 여기에 본 규격에서 제시한 전압/주파수의 동작 범위를 적용하여 그 NDZ는 식 3과 같이 나타난다.

$$-17.36\% \leq \frac{\Delta P}{P} \leq 29.13\% \quad (3)$$

$$-5.94\% \leq \frac{\Delta Q}{P} \leq 4.11\% \quad (4)$$

대표적인 SMS line은 식 5와 같이 정현파로 표현된다.

$$\theta_F[K] = \theta_M \sin \left[\frac{\pi}{2} \frac{(f_{Line[K-1]} - 60)}{f_M - 60} \right] \quad (5)$$

where: $\theta_F[K]$ is 출력전류의 시작위상

$f_{Line[K-1]}$ is 이전 주기에서 측정된 전압의 주파수

식 5에서처럼 θ_M and f_M 두 가지 설계 파라미터가 존재한다. 우선 적당한 θ_M 을 구하기 위해서 변위 역률을 고려해 볼 수 있다. 왜냐하면, 역률은 고조파 성분이 무시할 수 있을 적을 때 식 6에 의해서 유효전력과 무효전력 성분으로 표현할 수 있기 때문이다. 즉, 역률을 통해서 식 4의 NDZ 범위를 벗어나는 변위 역률 각을 식

7에서처럼 구할 수 있게 된다. 두 번째로, 정격 계통주파수에서 SMS line의 기울기는 반전된 부하의 기울기보다 커야지 동작점이 NDZ 밖에 존재하게 되어 단독운전을 검출할 수 있게 된다. 따라서 기울기 비교를 통해 식 8을 유도해 볼 수 있다.

$$pf = \cos \theta = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q}{P} \right)^2}} \quad (6)$$

$$\theta_M = \cos^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q}{P} \right)^2}} \right) \quad (7)$$

$$\frac{d\theta_F}{df} \Big|_{f=60Hz} = \frac{\theta_M \pi}{2(f_M - 60)} > \frac{d\theta}{df} \quad (8)$$

식 4에서 제시된 NDZ를 벗어나기 위해 계통으로 흘러가는 무효전력성분($\Delta Q/P$)은 6%로 선정할 수 있다. 따라서 두 설계파라미터에 대한 관계식은 식 9와 같이 정의 할 수 있다.

$$\theta_M = 3.4336^\circ, f_M < 61.07Hz \quad (9)$$

식 9 조건에서 계통연계상태이고, 정상 주파수 범위에서 가능한 한 높은 전력품질을 갖기 위해 f_M 은 60.7Hz로 선정한다. 식 5로부터 새로운 SMS line에 대한 정의를 식 10과 같이 할 수 있다.

$$\theta_F = \begin{cases} -\theta_M & \text{if } f_{Line[K-1]} < 59.3Hz \\ \theta_M \sin \left[\frac{\pi}{2} \frac{(f_{Line[K-1]} - 60)}{f_M - 60} \right] & \text{if } 59.3Hz \leq f_{Line[K-1]} < 60.7Hz \\ \theta_M & \text{if } f_{Line[K-1]} > 60.7Hz \end{cases} \quad (10)$$

$$\theta_Z + \theta_F = 0 \quad (11)$$

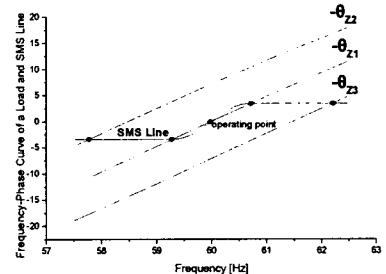


그림 4. SMS line과 반전된 load line 과의 주파수-위상 족선

그림 4에서 단독운전이 발생했을 때 모든 동작 주파수가 주파수 릴레이 NDZ를 벗어남을 확인 할 수 있다.

2.4 실험결과 및 분석

제안된 분석기법의 유효성을 검증하기 위하여, IEEE Std. 929-2000 의 단독운전 시험과 출력 전력품질에 대한 실험을 그림 5의 구성을 갖는 3kW PCS에서 실시하였다. 여기에서 사용된 PCS의 THD(Total Harmonic Distortion)는 계통이 연결되어 있고, 교류부하가 존재하지 않을 때 그 크기는 1% 이하가 되도록 제어 되었다.

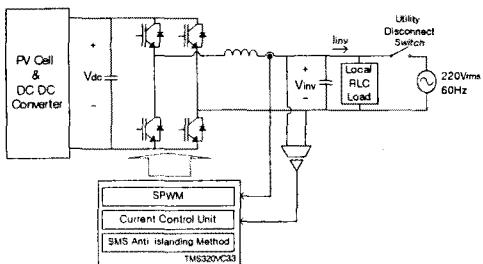


그림 5. 실험회로

그림 6는 역률의 이론적 분석치와 실험치의 비교를 그래프로 나타내었다. 분석치가 실험치와 비슷한 경향성과 크기를 가짐을 알 수 있다.

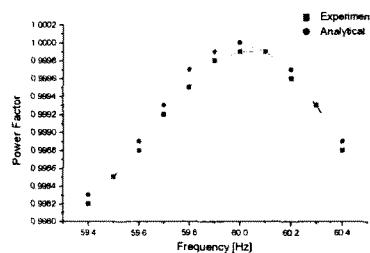
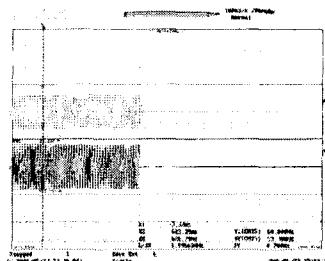
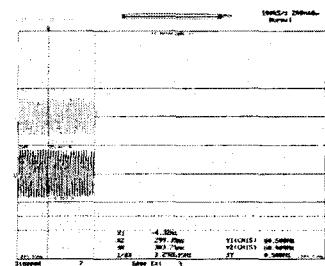


그림 6.1 SMS 기법에서 주파수에 따른 역률 관계



(a) $\Delta P/P \approx 0.3\%$, $\Delta Q/P \approx -0.2\%$



(b) $\Delta P/P \approx 0.3\%$, $\Delta Q/P \approx 0.2\%$

그림 7. 단독운전 시험 결과(CH1: 계통전압, CH2: 인버터 출력전압, CH5: 인버터 출력전류, CH15: 인버터출력전압의 주파수)

그림 7로부터 SMS는 대략 0에 가까운 조류 유효/무효전력일 때 단독운전을 IEEE Std. 929-2000에서 제시한 2초 이내에 검출함을 확인 할 수 있다. 주파수가 상승하느냐 하강하느냐는 적은 크기의 외란 무효전력성분

이 양이냐 음이냐에 따라 결정되는 것임을 알 수 있다. 또한 다른 부하조건(θZ_2 , θZ_3)에서 SMS는 이전 부하조건 보다(θZ_1) 더 빨리 단독운전을 검출함을 확인할 수 있다. 그 이유는 PLL 출력의 위상 오차가 단독운전 발생 시 더 크게 나타나기 때문이다.

3. 결 론

본 논문은 단독운전 검출을 위한 SMS 기법의 모델링과 분석기법을 제시하였다. IEEE Std. 929-2000 규격을 만족시키기 위한 SMS line의 설정을 위해서 PMS로 표현되는 정량적 NDZ를 사용하였다. 3kW의 PCS를 통해 본 분석에 대한 이론적 타당성을 검증하였고, 그 결과 규격에 만족하는 단독운전 검출성능과 전력품질을 가짐을 확인하였다.

본 연구는 R-2004-1-143 의 지원에 의하여
수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Ropp, "design issues for grid-connected photovoltaic systems," Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, December 1998.
- [2] G.K. Hung, C.C. Chang, C.L. Chen "Automatic Phase-Shift Method for Islanding Detection of Grid-Connected Photovoltaic Inverters" IEEE Transactions on Energy Conversion, VOL. 18, NO. 1, March 2003
- [3] Zhihong Ye, Amol Kolwalkar, Yu Zhang, Pengwei Du, Reigh Walling "Evaluation of Anti-Islanding Schemes Based on Nondetection Zone Concept" IEEE Transactions on Power Electronics, VOL. 19, NO. 5, September 2004-12-01
- [4] "IEEE Std. 929-2000, IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic Systems", April, 2000.
- [5] G.A. Smith, P.A. Onions, D.G. Infield "Predicting islanding operation of grid connected PV inverters" IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 147, No. 1, January 2000